

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль теоретическая и промышленная теплотехника

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Термическая подготовка и воспламенение капель водоугольного топлива в условиях интенсивного радиационно-конвективного и кондуктивного нагрева</b>

УДК 662.66-032.2.536.331

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Девяшина Елена Вадимовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Сыродой С.В.	к.т.н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский М.В.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель Отделения/НОЦ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Антонова А.М			

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы  
бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества,

	соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль теоретическая и промышленная теплотехника

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель профиля

\_\_\_\_ Бульба Е.Е.

(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
<b>5Б4Б</b>	<b>Девяшина Елена Вадимовна</b>

Тема работы:

**Термическая подготовка и воспламенение капель водоугольного топлива в  
условиях интенсивного радиационно-конвективного и кондуктивного  
нагрева**

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования;  
производительность или нагрузка; режим работы  
(непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид  
сырья или материал изделия; требования к продукту,  
изделию или процессу; особые требования к особенностям  
функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в  
плане безопасности эксплуатации, влияния на  
окружающую среду, энергозатратам; экономический  
анализ и т. д.).*

Объект исследования – частица водоугольного топлива, находящаяся в топочном пространстве котельного агрегата с циркулирующим кипящим слоем.

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Аналитический обзор литературы и научных публикаций по направлению исследования; физическая постановка задачи; разработка математической модели зажигания водоугольной частицы на основе физической модели; верификация программного продукта; проведение теоретических исследований; заключение.
<b>Перечень графического материала</b>	21 слайд

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталия Геннадьевна, ст. преп., отделение социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	Василевский Михаил Викторович, доцент, отделение контроля и диагностики

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Сыродой С.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Девяшина Елена Вадимовна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 70 с., 12 рисунков, 3 таблицы, 66 источников.

Ключевые слова: математическое моделирование, водоугольное топливо, циркулирующий кипящий слой, время задержки зажигания, тепломассоперенос, теоретическое исследование, топочное пространство, инертный материал.

Объектом исследования являются частицы водоугольного топлива, находящиеся в топочном пространстве котельного агрегата с циркулирующим кипящим слоем.

Цель работы – разработка математической модели и анализ основных закономерностей процессов тепломассопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельного агрегата (интенсивный радиационно-конвективный и кондуктивный теплообмен).

В процессе работы проводились теоретические исследования по определению влияния внешних факторов на характеристики и условия зажигания.

В результате исследования были получены времена задержки зажигания частиц водоугольного топлива при различных температурах окружающей среды и инертного материала, размерах частиц ВУТ и инертного материала, марках углей и природе инертных частиц.

Область применения: результаты теоретических исследований, проведенных в работе, могут стать базой для проектирования топочных устройств котельных агрегатов, работающих на водоугольном топливе.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 10.0 и редакторе формул MathType .

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

### Принятые обозначения:

$c$  – теплоемкость,  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;

$\rho$  – плотность,  $\frac{кг}{м^3}$ ;

$T$  – температура, К;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\frac{Вт}{м \cdot K}$ ;

$r$  – радиус, м;

$\varphi$  – азимутальный угол, рад.;

$\eta$  – доля химически разложившегося вещества;

$C$  – концентрация;

$h_R$  – шаг разностной сетки по радиусу, м;

$h_\varphi$  – шаг разностной сетки по углу, м;

$h_\tau$  – шаг по времени, с.

### Подстрочные индексы:

и – фронт испарения;

ч – частица ВУТ;

п – инертный материал;

г – газовая область;

0 – начальный момент времени;

м – масштаб.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	10
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	14
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	18
2.1 Физическая постановка .....	18
2.2 Математическая постановка задачи .....	20
2.3 Методы решения .....	24
2.4 Решение тестовых задач: .....	26
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ И ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА .....	30
3.1 Влияние марки угля на характеристики и условия воспламенения .....	30
3.2 Зависимость времени задержки зажигания частиц ВУТ от температуры газовой среды .....	32
3.3 Влияния температуры инертного материала на характеристики и условия зажигания .....	34
3.4 Анализ зависимости времени задержки зажигания от природы инертного материала .....	35
3.5 Влияние геометрических размеров частиц ВУТ и инертного материала .....	37
3.6 Рекомендации по конструированию топочных устройств водоугольных котельных агрегатов .....	38
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	42
4.1 Планирование работ и оценка времени их выполнения .....	42



4.2 Смета затрат на НИР .....	43
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕСТСВЕННОСТЬ.....	49
Введение.....	49
5.1 Производственная безопасность .....	50
5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	50
5.3 Охрана окружающей среды .....	53
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	56
5.5 Пожарная безопасность .....	57
5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	63

## ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации на данный момент 66% электрических станций работают на угле [1] и согласно энергетической политике, принятой в 2009 г. [2] этот процент будет только расти. Такой топливный баланс оказывает чрезмерную нагрузку на природную среду, в основном за счет выбросов в атмосферу оксидов серы и азота, а также производственной пыли [3]. По этой причине добывающая промышленность вынуждена развивать новые более энерго- и экологически эффективные угольные технологии. Применение водоугольного топлива (ВУТ) является одним из самых перспективных технологических решений. Но в связи с проблемами, возникающими при приготовлении и сжигании ВУТ, на данный момент данный вид топлива в России не получил широкого признания.

В общем случае ВУТ представляет собой сложную гетерогенную структуру, состоящую из мелко диспергированного угля и воды, с добавлением различных присадок и пластификаторов, которые позволяют сохранить твердые частицы во взвешенном состоянии [4].

Причем фазовая концентрация угля, обеспечивающая устойчивость водоугольного топлива, зависит от размеров частиц угля и степеней его метаморфизма. Для углей с большим содержанием летучих суспензия обладает высокой липкостью с влажностью не более 50%, для фракционного угля с содержанием летучих 10-15% предельная влажность уменьшается до 40-45% [5]. Что касается антрацита, который обладает небольшой гидростатической влажностью, эти значения еще меньше. Минимальное значение влажности, при котором водоугольная суспензия может транспортироваться по трубопроводам и обрабатываться, оставаясь в стабильном состоянии, является 45-50% [5].

Идея применения водоугольных технологий не нова. С период топливного кризиса 1970-х годов в ряде стран (Швеция, США, Италия, Канада, Украина) начались работы по исследованию и внедрению установок по производству и использованию водоугольных суспензий [6]. Но мировым

лидером в области разработки и внедрения ВУТ является Китай [6], где существует 3 научно-исследовательских центра, а суммарное производство энергии на котельных и электростанциях, работающих на ВУТ, достигает 2 млн. кВт [6]. В период топливного кризиса 1970-х годов интерес к разработке ВУТ был обоснован возможностью эффективной утилизации шламов, образующихся на углеобогащательных фабриках.

В сравнении с традиционными топливами ВУТ имеет ряд преимуществ (как экологических, так и экономических), которые обуславливают возможность целенаправленного производства и сжигания водоугольных суспензий.

Из наиболее значимых экологических преимуществ можно выделить следующие [6,7,8]:

1. зола, образующаяся при сжигании ВУТ содержит не более 3% несожжённого углерода, поэтому не требует утилизации и может применяться как наполнитель для бетонов;

2. в качестве сырья для ВУТ можно использовать канализационные стоки и отходы с содержанием органики;

3. возможна утилизация автомобильных покрышек путём получения из них пирокарбона, служащего сырьем для ВУТ;

4. механический недожог угля в составе водоугольной суспензии составляет не более 1%, соответственно выбросы шлама в атмосферу отсутствуют;

5. достигается значительное уменьшение выбросов оксидов азота, оксидов углерода и оксидов серы по сравнению со слоевым сжиганием угля.

Таким образом, водоугольное топливо на всех стадиях производства и использования можно считать экологически безопасным.

Из наиболее значительных экономических преимуществ применения ВУТ можно отметить следующие [6,7,8]:

1. снижение затрат на доставку топлива за счёт возможности применения ВУТ как основного в негазифицированных районах, т.к. для его изготовления можно использовать большинство местных углей;

2. в качестве сырья возможно использование угольных отсеков с фракциями до 1 – 6 мм, обычно утилизируемых как отход;

3. достигается более полное (не менее 98%) сжигание угля в форме ВУТ по сравнению со слоевым сжиганием, что ведёт к отсутствию затрат на утилизацию несгоревшего угля.

Всё это позволит уменьшить стоимость топливной составляющей 1 Гкал по сравнению с традиционными видами топлива.

Почти полное сжигание ВУТ (до 98%) достигается благодаря газификации содержащегося в нем угля. При этом образуется синтез-газ, который при температурах выше 900 градусов вступает в реакцию с водородом и кислородом, образовавшимся в результате разложения воды [9].

При моделировании процесса горения ВУТ возникает проблема, связанная с наличием большой совокупности частиц [4,10]. Это является причиной того, что к настоящему моменту научные основы проектирования котельных агрегатов, работающих на данном виде топлива, практически отсутствуют. При этом знание закономерностей процесса горения одной частицы позволит считать ее типичной.

На сегодняшний день разработаны несколько концепций сжигания водоугольного топлива в котлах различных мощностей. К ним относятся: классическое факельное сжигание в камерной топке, сжигание в кипящем слое, совместное сжигание с другими видами топлива (газ, уголь) [11-15].

Благодаря тому, что технология сжигания в циркулирующем кипящем слое, в отличие от факельного сжигания, позволяет использовать различные виды топлива без затратных реконструкционных решений [16], этот способ сжигания ВУТ является одним из наиболее перспективных.

Основной отличительной чертой технологии сжигания топлив в топочном пространстве с кипящим слоем является наличие инертного

материала, который налипает на поверхность частицы ВУТ сразу после ее внедрения. При этом инертный материал не участвует в процессе горения, а прилипание к поверхности зависит от типа угля, влажности суспензии и скорости воздушного потока [16].

Теоретические и экспериментальные исследования зажигания одиночных водоугольных частиц затруднено в связи с большим числом факторов, значительно влияющих на характеристики и условия воспламенения. Необходимо отметить, что частицы угля в капле суспензии расположены неравномерно и жидкость объединяет их в агломераты. Причем у внутренней поверхности формируются более мелкие группы, а внутри суспензии более крупны [5]. При этом, в процессе испарения, шламовые агломераты не распадаются.

## 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Небольшое количество теоретических исследований, существующие на данный момент выполнены в рамках очень простых математических моделей [5,18], которые не учитывают совместное протекание ряда физико-химических процессов при интенсивном нагреве (теплообмен между частицей ВУТ, инертным материалом и высокотемпературной газовой средой, теплопроводность, испарение влаги с дальнейшей фильтрацией паров через углеродистый каркас, термическое разложение органической части топлива с образованием газообразных продуктов сгорания, диффузия продуктов пиролиза в слое внешней среды [17]). Помимо этого разработанные математические модели не учитывают неоднородность температурных полей, вызванную изменением теплофизических свойств водоугольной суспензии в процессе ее подготовки к зажиганию [17,19] (при удалении влаги и термическом разложении топлива).

Современное состояние проблемы научно-технического обоснования применения ВУТ в энергетике отражают работы [20-28], получившие дальнейшее развитие в трудах И.В. Давыдовой [29,30], А.Г. Онищенко [31,32], Исаева В.В [33-36], Т.Н. Бутылковой [37,38].

Из зарубежных исследователей наибольших успехов в разработке технологий гидротранспорта и сжигания водоугольных суспензий достигли коллективы под руководством О. Шварца и Г. Мертена [39], а также И. Тайдзона и С. Суэтиэро [40]. В ФРГ проводились исследования, посвященные непосредственному сжиганию водоугольного топлива в топочном устройстве котельного агрегата [40]. В США решались только задачи транспортировки ВУТ.

Одним из важных вопросов применения водоугольной суспензии на ТЭС является ее транспортировка. Исходя из анализа транспортных расходов [20-24], перемещение топлива по трубопроводам позволит снизить затрат на его перемещение более чем в 2 раза[55]. Вследствие уменьшения затрат на

собственные нужды ВУТ является более технологичны по сравнению со сжиганием пылеугольного топлива. Но значимым фактором при определении эффективности использования водоугольного топлива является способ его доставки. Известно, что при транспортировке ВУТ на большие расстояния предпочтительно использовать трубопроводный транспорт [6,7,9].

К настоящему времени технологии производства и использования ВУТ разработаны до уровня возможного внедрения в теплоэнергетику [20-24]. На котлах малой и средней мощности выполнены полномасштабные промышленные испытания применения ВУТ [56,57].

Следует подчеркнуть, что применение ВУТ в малых котлах создаёт предпосылки значительного сокращения вредных выбросов в окружающую среду в процессе производства, при транспортировке и хранении, а также при его сжигании. Существенный экологический эффект достигается при утилизации угольных шламов, образующихся на углеобогажительных фабриках [21,57]. Однако, нерешенные проблемы, связанные с теоретическим обоснованием конструктивных характеристик топочных камер водоугольных котельных агрегатов, препятствуют развитию этого перспективного направления теплоэнергетики.

В основном математические модели процесса зажигания капель ВУТ сформулированы с рядом существенных допущений. В [58-62] предполагается, что стадии процесса зажигания проходят последовательно, что позволяет находить относительно простые приближенные решения, рассматривая каждую стадию как отдельную задачу.

Коллективами под руководством В.И. Мурко [41-46] и Овчинникова Ю.В [47,48] выполнено компьютерное моделирование процесса горения частиц водоугольного топлива в топочных камерах. В основу используемых расчетных комплексов заложены [43] математические модели, базирующиеся на той же гипотезе о дискретности основных процессов «термической подготовки» [43,45].

Решения, полученные при допущении о раздельности процессов, предшествующих зажиганию, применимы только для частиц с характерным размером менее 100 мкм. Для более крупных частиц возникает необходимость учета совместности предшествующих воспламенению процессов.

Больших успехов в исследовании процессов термической подготовки и зажигания ВУТ в топочных пространствах добился С.В. Сыродой [17]. Учет совместного протекания основных процессов термической подготовки позволило уточнить закономерности процессов тепло- и массопереноса и установить влияние большого количества характеристик (температуры внешней среды, размеров частицы, эндотермических эффектов, конфигурации частицы, концентрации угля в частице ВУТ, гетерогенности структуры, марки и типа углей, условий теплообмена с внешней средой). При этом сжигание в циркулирующем кипящем слое имеет ряд особенностей, значительно влияющих на процессы зажигания ВУТ. В первую очередь это наличие разогретого инертного материала, контакт с которым значительно ускоряет процесс пиролиза в водоугольной частице.

Необходимо отметить, что в 60-х годах в СССР были заложены фундаментальные основы гидродинамики и тепломассообмена псевдооживленного слоя. Широко известны работы С. С. Забродского, О. М. Тодеса, М. Э. Аэрова, Н. И. Гальперина, В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова [49 – 54]. Их результаты использованы в разработке и внедрении аппаратов с кипящим слоем (КС) в химической промышленности и металлургии. Некоторые из них также использовались при реконструкции небольших котлов с КС. Вопросы гидродинамики циркулирующего кипящего слоя в это время не были достаточно изучены в особенности к условиям работы топочных устройств.

Обоснование использования технологии ЦКС с помощью расчетно-аналитических и экспериментальных исследований проводится в ВТИ с 1989 г [16]. В этих работах принимали участие многие организации, в числе которых Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург), Институт проблем



энергосбережения АН Украины (г. Киев), Институт теплофизики СоРАН (г. Новосибирск), КазНИИЭнергетики (г. Алма-Ата), Московский энергетический институт и др [16].

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что теоретические данные, описывающие основные закономерности процессов подготовки и зажигания частиц водоугольного топлива, отсутствуют. Как следствие проектирование топочных устройств котельных агрегатов, работающих на ВУТ, затруднено. Соответственно, разработка математической модели и анализ основных процессов тепло- и массопереноса при зажигании частицы ВУТ в топочном пространстве котельного агрегата с циркулирующим кипящим слоем является актуальной и не решенной до настоящего времени задачей.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 2.1 Физическая постановка

Рассматривается задача тепломассопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива, в условиях интенсивного радиационно-конвективного и кондуктивного нагрева. При моделировании процесса зажигания ВУТ предполагалось, что в начальный момент времени ( $t=0$ ) частица попадает в высокотемпературную газовую среду топочного пространства котельного агрегата с циркулирующим кипящим слоем, забалластированную инертными частицами. В результате происходит взаимодействие капель ВУТ и инертного материала. Вследствие комплексного воздействия сил адгезии и когезии происходит "налипание" инертных частиц на поверхность капель ВУТ. Вследствие радиационно-конвективного нагрева газовой средой и кондуктивного взаимодействия частиц инертного материала с высоким теплосодержанием инициируется процесс испарения воды. Необходимо отметить, что теплофизические характеристики газовой среды и инертного материала существенно отличаются. Поэтому в частице ВУТ формируется существенно нелинейный фронт испарения, форма которого определяется распределением тепловых потоков по всему объему капли.

По мере прогрева ВУТ фронт испарения продвигается от поверхности вглубь частицы. Температура на границе фронта испарения зависит от интенсивности испарения. В результате формируется слой пористого сухого топлива. Проходя через пористый углеродистый каркас испарившаяся влага фильтруется. Водяной пар с обезвоженным углем вступают в эндотермическую химическую реакцию. Как только температура на поверхности частицы достигает критического значения в частице начинается термическая деструкция органической части топлива с выделением летучих. При дальнейшем тепловом воздействии температура в каждой точке ВУТ повышается, и фронт испарения продвигается вглубь частицы. В результате формируется гетерогенная структура, которую можно разделить на две характерные зоны (рисунок 1): (1)

– влагонасыщенное топливо (исходное состояние); (2) – «обезвоженного» уголь.

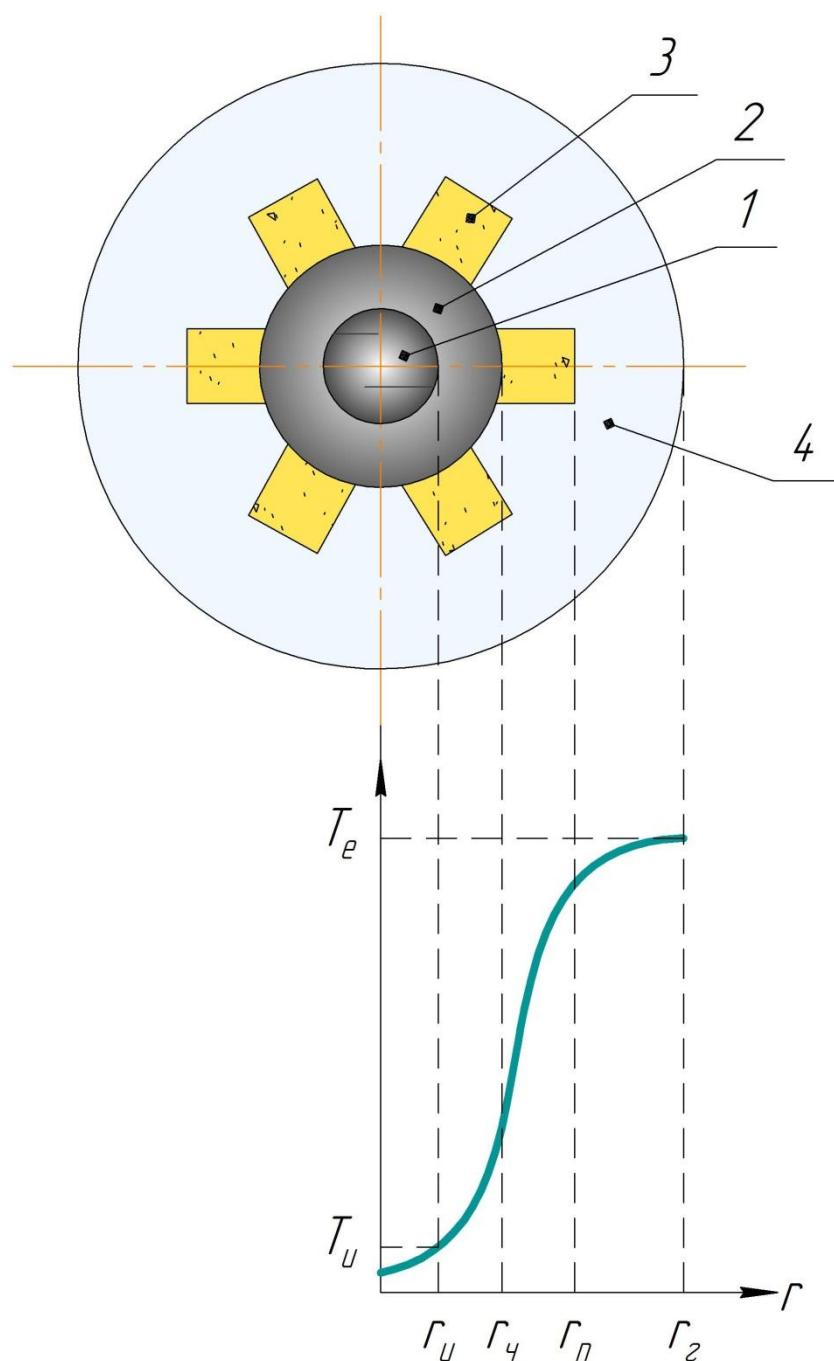


Рисунок 1 – Схема области решения задачи:

1 – влагонасыщенное топливо (исходное состояние); 2 – «обезвоженного» уголь; 3 – инертный материал; 4 – газовая область.

По достижению критических значений температуры и концентрации газовая смесь, являющаяся продуктом термического разложения, воспламеняется. Период времени от начала теплового воздействия на частицу

до начала интенсивного (с появлением пламени) химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем, называется временем задержки зажигания.

Задача решалась в сферической системе координат, при этом начало координат соответствует центру частицы. Диаметр частицы  $d_q$  и размеры частиц инертного материала варьировались в диапазоне  $d_q = 0,002 \div 0,006$  м.

В реальной конфигурации, частица водоугольного топлива представляет собой неправильный многогранник, моделирование которой затруднительно. Поэтому, принимает, что частица имеет сферическую форму.

Частицы инертного материала также, как правило, представляют собой неправильные многогранники, число граней и размеры которых изменяются случайным образом. Это крайне затрудняет процесс моделирования. Для упрощения задачи принято, что инертные частицы имеют одинаковую правильную кубическую форму и их размеры и положение на частице ВУТ не меняется в процессе нагрева.

Помимо вышеперечисленных, для упрощения решения при численном решении принимались следующие допущения:

- Частица нагревается за счет конвекции и излучения;
- Принято, что основным компонентом газообразных продуктов термического разложения является метан ( $\text{CH}_4$ );
- Водоугольная суспензия обладает однородной структурой и не подвергается фрагментации в процессе горения.

## 2.2 Математическая постановка задачи

Выше сформулированной физической модели соответствует следующая система нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных:

Распределение температуры в частице ВУТ, представляющей собой неоднородную гетерогенную систему, описывает уравнение энергии, учитывающее эндотермические эффекты испарения воды и термического разложения органической части угля:

$$c(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) - \frac{Q_{исп} \cdot W_{исп}}{h} \cdot \delta(r, \varphi) -$$

$$- Q_{мп} \cdot \rho_q \cdot (1 - \eta) \cdot k \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \cdot H(r, \varphi);$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_q,$$

где  $Q_{исп}$  – тепловой эффект испарения воды;  $W_{исп}$  – массовая скорость испарения;  $E$  – энергия активации химической реакции;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\delta(r, \varphi)$  – функция Дирака;  $H(r, \varphi)$  – функция Хэвисайда;  $\rho_q$  – плотность топлива;  $k$  – предэкспонент химической реакции

Массовая скорость испарения рассчитывалась по формуле:

$$W_{исп} = W_0 \cdot \exp \left( -\frac{Q_{исп} \cdot \mu \cdot (T_u - T_3)}{R \cdot T_u \cdot T_3} \right), \quad (2)$$

где  $T_u$  – температура на границе испарения, К;  $T_3$  – температура, К;  $W_0$  – скорость испарения при температуре  $T_3$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;  $\mu$  – молярная масса водяного пара,  $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .

Уравнение химической кинетики для органической части топлива:

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} = (1 - \eta_2) \cdot k_0 \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT_2} \right)$$

$$t > 0, \quad r_u < r < r_q, \quad T \geq T_u$$

Уравнение энергии для газовой области:

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) +$$

$$+ Q_{CH_4} \cdot \rho \cdot k \cdot (1 - C_{CH_4} - C_{H_2O}) \cdot C_{CH_4} \cdot \exp \left( -\frac{E}{R \cdot T} \right)$$

$$t > 0, \quad r_q < r < r_2$$

Уравнение энергии для инертного материала:

$$c_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \quad (5)$$

Концентрация метана определяется из уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial r} \right) + \frac{D}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial \varphi} \right) \quad (6)$$

Концентрация водяных паров определяется аналогично:

$$\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial r} \right) + \frac{D}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial \varphi} \right) \quad (7)$$

Скорость реакции вычислялась по закону Аррениуса:

$$W_i = k_i \cdot C_i \cdot \rho_i \cdot \exp \left( -\frac{E_i}{R \cdot T} \right) \quad (8)$$

Решение системы уравнений (1-8) должно удовлетворять следующим краевым условиям и замыкающим соотношениям:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (9)$$

На внешней границе газовой среды принимаем аналог мягких граничных условий:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0; \quad (10)$$

На границах «частица ВУТ-инертный материал», «частица ВУТ-газ» и «газ-инертный материал» задаемся граничными условиями четвертого рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n}; \quad (11)$$

где  $\bar{n}$  – вектор нормали.

Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» частей ВУТ рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\begin{aligned} \lambda_{вл} &= \varphi_3 \cdot \lambda_3 + \varphi_4 \cdot \lambda_4; & \lambda_{сyx} &= \varphi_6 \cdot \lambda_6 + \varphi_5 \cdot \lambda_5; \\ c_{вл} &= \varphi_3 \cdot c_{p3} + \varphi_4 \cdot c_{p4}; & c_{сyx} &= \varphi_6 \cdot c_{p6} + \varphi_5 \cdot c_{p5}; \\ \rho_{вл} &= \varphi_3 \cdot \rho_3 + \varphi_4 \cdot \rho_4; & \rho_{сyx} &= \varphi_6 \cdot \rho_6 + \varphi_5 \cdot \rho_5; \end{aligned}$$

где  $\varphi$  – объемная доля соответствующего компонента топлива: 3 – вода; 4 – уголь, температура которого меньше  $T_{кр}$ ; 5 – уголь, температура которого больше  $T_{кр}$ ; 6 – воздух.

Система уравнений (1-11) приведена к безразмерному виду. Использование безразмерной формы записи позволит привести значения вычисляемых величин к соответствующей шкале и позволит производить обработку результатов в общей критериальной форме, которая содержит минимальное число параметров. Эти цели могут быть достигнуты выбором масштабов, в качестве которых выбраны: координат – радиус частицы  $r_0$ , температуры – температура внешней среды  $T_e$ , теплофизических свойств – теплофизические характеристики влагонасыщенной части ВУТ. Для перехода к безразмерным переменным использованы следующие соотношения:

$$R = \frac{r}{r_m}; \quad \tau = \frac{t}{t_m}; \quad C = \frac{c}{c_m}; \quad P = \frac{\rho}{\rho_m}; \quad \Lambda = \frac{\lambda}{\lambda_m};$$

$$\Theta = \frac{T}{T_e}; \quad Fo = \frac{a \cdot t}{r_m^2}; \quad Pom_i = \frac{Q_i \cdot W_i \cdot r_m^2}{\lambda \cdot T_e}; \quad Fo_d = \frac{D \cdot \tau_m}{R_m^2}.$$

Уравнение энергии для водоугольной частицы:

$$\frac{C_1 \cdot P_1}{Fo_1} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \cdot \Lambda_1 \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \Lambda_1 \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \varphi} \right) - Pom_{ucn} - Pom_{mp} \quad (12)$$

$$Fo > 0, \quad 0 < R < R_q$$

Уравнение химической кинетики для органической части топлива записывается без изменений:

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} = (1 - \eta_2) \cdot k_0 \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT_2} \right)$$

$$t > 0, \quad r_u < r < r_q, \quad T \geq T_u$$

Уравнение энергии для газовой области:

$$\frac{1}{Fo} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \varphi} \right) + Pom_3 \quad (13)$$

Уравнение энергии для инертного материала

$$\frac{1}{Fo} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \varphi} \right) \quad (14)$$

Концентрация метана определяется из уравнения диффузии:

$$\frac{1}{Fo_d} \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial \varphi} \right) \quad (15)$$

где  $Fo_d$  – аналог критерия Фурье для уравнения диффузии.

Концентрация водяных паров определяется аналогично:

$$\frac{1}{Fo_d} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial \varphi} \right) \quad (16)$$

### 2.3 Методы решения

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных (12-16) с советующими начальными и граничными условиями использовался метод конечных разностей. Решения нелинейных уравнений осуществлялось с помощью метода итераций. Система нелинейных одномерных дифференциальных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Задача испарения решена методом квази неявного выделения фронта испарения [63]. Вычисления проводились методом прогонки по всей выделенной области.

Например, уравнение теплопроводности для инертного материала аппроксимировалось следующим образом:

Дискретизация двумерных уравнений проводилась на основе локально одномерной схемы А.А. Самарского [63], сущность которой состоит в том, что шаг по времени делится. На промежуточном временном шаге производится дискретизация только в направлении радиуса, в результате которой получаем одномерное уравнение. Затем вновь проводим дискретизацию, но уже в направлении азимута. Решая полученное одномерное уравнение, определяем поле температуры на целом шаге по времени.

$$\frac{1}{Fo} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \varphi} \right) \quad (17)$$

Дифференциальные операторы в (17) заменялись на их конечно-разностные аналоги [63]:



$$\frac{1}{Fo} \cdot \frac{\Theta_{i,j}^{n+1} - \Theta_{i,j}^n}{h_\tau} = \frac{1}{h_R^2 \cdot R^2} \cdot \left[ R_{i+1/2,j}^2 \cdot (\Theta_{i+1,j}^{n+1} - \Theta_{i,j}^{n+1}) - R_{i-1/2,j}^2 \cdot (\Theta_{i,j}^{n+1} - \Theta_{i-1,j}^{n+1}) \right] \quad (18)$$

$$\frac{1}{Fo} \cdot \frac{\Theta_{i,j}^{n+1} - \Theta_{i,j}^n}{h_\tau} = \frac{1}{h_\varphi^2 \cdot R^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \left[ \sin \varphi_{i,j+1/2} \cdot (\Theta_{i,j+1}^{n+1} - \Theta_{i,j}^{n+1}) - \sin \varphi_{i,j-1/2} \cdot (\Theta_{i,j}^{n+1} - \Theta_{i,j-1}^{n+1}) \right] \quad (19)$$

$$\text{где} \quad R_{i+1/2,j} = \frac{R_{i,j} + R_{i+1,j}}{2}; \quad R_{i-1/2,j} = \frac{R_{i-1,j} + R_{i,j}}{2}; \quad \sin \varphi_{i,j+1/2} = \frac{\sin \varphi_{i,j} + \sin \varphi_{i,j+1}}{2};$$

$$\sin \varphi_{i,j-1/2} = \frac{\sin \varphi_{i,j-1} + \sin \varphi_{i,j}}{2}.$$

Разностное уравнение сводилось к трехдиагональному виду и решалось методом прогонки [64]:

$$A_i \cdot \Theta_{i+1,j}^{n+1} - B_i \cdot \Theta_{i,j}^{n+1} + C_i \cdot \Theta_{i-1,j}^{n+1} = F_i \quad (21)$$

где:

$$A_i = \frac{1}{R^2 \cdot h_R^2} \cdot R_{i+1/2,j}^2; \quad (22)$$

$$B_i = \frac{1}{Fo \cdot h_\tau} + \frac{1}{h_R^2 \cdot R^2} \left[ R_{i+1/2,j}^2 + R_{i-1/2,j}^2 \right]; \quad (23)$$

$$C_i = \frac{1}{R^2 \cdot h_R^2} \cdot R_{i-1/2,j}^2; \quad (24)$$

$$F_i = -\frac{1}{Fo \cdot h_\tau} \cdot \Theta_{i,j}^n; \quad (25)$$

$$A_j = \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi \cdot h_\varphi^2} \cdot \sin \varphi_{i,j+1/2}; \quad (26)$$

$$B_j = \frac{1}{Fo \cdot h_\tau} + \frac{1}{h_R^2 \cdot \sin \varphi \cdot R^2} \left[ \sin \varphi_{i,j+1/2} + \sin \varphi_{i,j-1/2} \right]; \quad (27)$$

$$C_j = \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi \cdot h_\varphi^2} \cdot \sin \varphi_{i,j-1/2}; \quad (28)$$

$$F_j = -\frac{1}{Fo \cdot h_\tau} \cdot \Theta_{i,j}^n. \quad (29)$$

Вычисления значений температур в каждом узле пространственной сетки проводилось, с помощью формулы [64]:

$$\Theta_{i-1,j}^{n+1} = \alpha_i \cdot \Theta_{i,j}^{n+1} + \beta_i \quad (30)$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – прогоночные коэффициенты, определяющиеся из следующих выражений:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}; \quad (31)$$

$$\beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_i - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \quad (32)$$

На первом шаге по времени, исходя из граничных условий, вычисляются коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\beta_0$ . После чего прямой прогонкой определяются коэффициенты  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  в каждом узле разностной сетки [158]. После того, как температура на правой границе области решения известна, выполняется обратная прогонка, в ходе которой определялись значения температуры в каждом узле сетки.

## 2.4 Решение тестовых задач:

Верификация разработанной математической модели проводилась путем решения простых тестовых задач с известным результатом.

### 2.4.1 Одномерный теплоперенос в двухслойной сферической частице

Решена задача теплопереноса в двухслойной сфере радиуса  $R=0,1$  м. Определено температурное поле через 100, 500, 1000 секунд процесса нагрева. Внутренний материал 1 – кирпич ( $c_1 = 450$  Дж/(кг · К),  $\rho_1 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_1 = 92$  Вт/(м · К)), внешний 2 – бетон ( $c_2 = 840$  Дж/(кг · К),  $\rho_2 = 500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 140$  Вт/(м · К)). Граница  $r=R$  подвержена воздействию окружающей среды ( $T^e = 700$  К,  $\alpha = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ). Начальная температура  $T_0 = 300$  К. Геометрия задачи представлена на рис. 2.

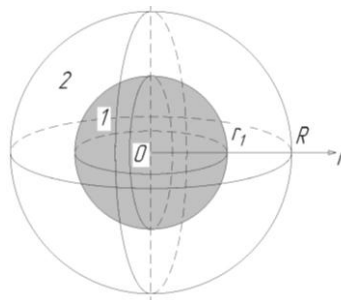


Рисунок 2 – Геометрия задачи

Результаты расчетов приведены на рис.3

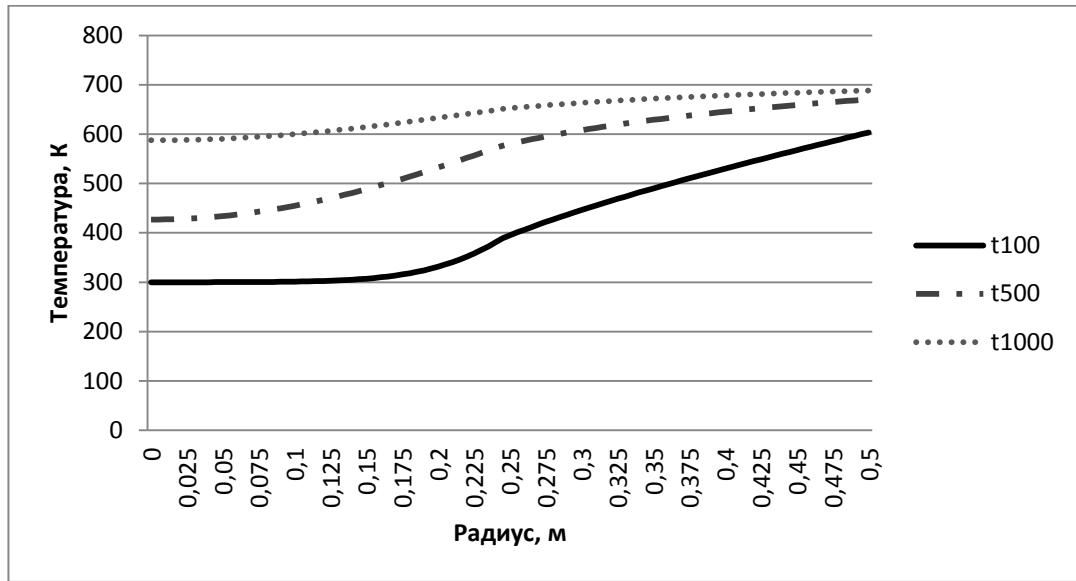


Рисунок 3 – Распределение температуры по радиусу многослойной сферы в различные моменты времени

#### 2.4.2 Одномерный теплоперенос в пластине, подверженной термическому разложению

Определено температурное поле в пластине, подверженной термическому разложению, через 180, 560, 1800 секунд процесса нагрева. Решена система уравнений, где  $\eta$  – параметр выгорания:

$$\begin{cases} c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q(1 - \eta)\rho k \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \\ \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = (1 - \eta)k \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \end{cases}$$

Начальная температура  $T_0=298$  К. Толщина пластинки  $L=0,2$  м. Материал пластины – полимер со следующими теплофизическими характеристиками:  $c = 450$  Дж/(кг · К),  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 92$  Вт/(м · К). На границах  $x=0$  и  $x=L$  пластина контактирует с окружающей средой ( $T^e = 243$  К,  $\alpha = 40$  Вт/(м<sup>2</sup> · К)). Тепловой эффект химической реакции  $q_{\text{хим}} = 10^3$  Вт/кг, предэкспонент химической реакции  $k_0 = 3 \cdot 10^4$ , энергия активации химической реакции  $E = 8 \cdot 10^4$  Дж/моль.

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 4.

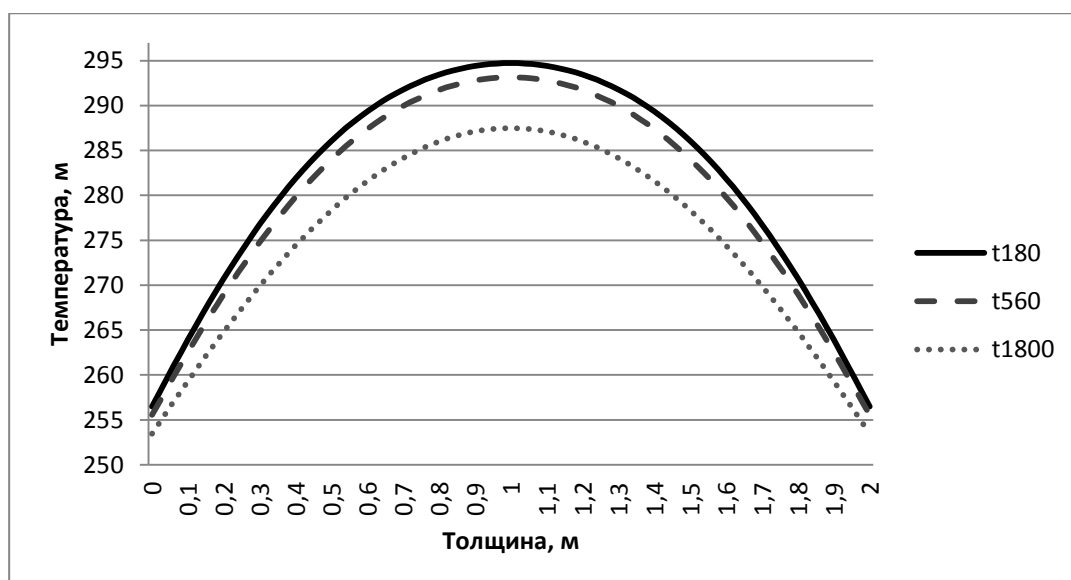


Рисунок 4 – Распределение температуры по толщине пластины в различные моменты времени (с использованием неявной разностной схемы)

Несмотря на то, что реакция термического разложения идет с поглощением тепла, при теплообмене с окружающей средой на границах пластина остывает. При увеличении времени в одинаковых координатах и на границах температура при более длительном воздействии ниже.

#### 2.4.3 Одномерный теплоперенос при фазовом переходе

Влажный грунт (рис.5) находится в талом состоянии и имеет начальную постоянную температуру  $T_0=293$  К. В начальный момент времени на поверхности грунта внезапно устанавливается температура  $T_c=268$  К, которая ниже температуры замерзания  $T_3=273$  К. Глубина слоя грунта  $L=0,3$  м. Теплофизические характеристики промерзшей зоны грунта –  $c_1 = 2090$  Дж/(кг · К),  $\rho_1 = 917$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_1 = 2,3$  Вт/(м · К). Теплофизические характеристики талой зоны грунта –  $c_2 = 4220$  Дж/(кг · К),  $\rho_2 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 0,6$  Вт/(м · К). Теплота фазового перехода  $Q_\phi = 3,32 \cdot 10^5$  Дж/кг. Влажность грунта  $w=1$  кг/кг.

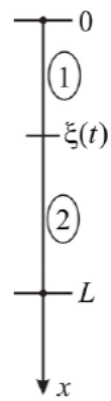


Рисунок 5 – Область решения

Результаты расчетов приведены на рис.6.

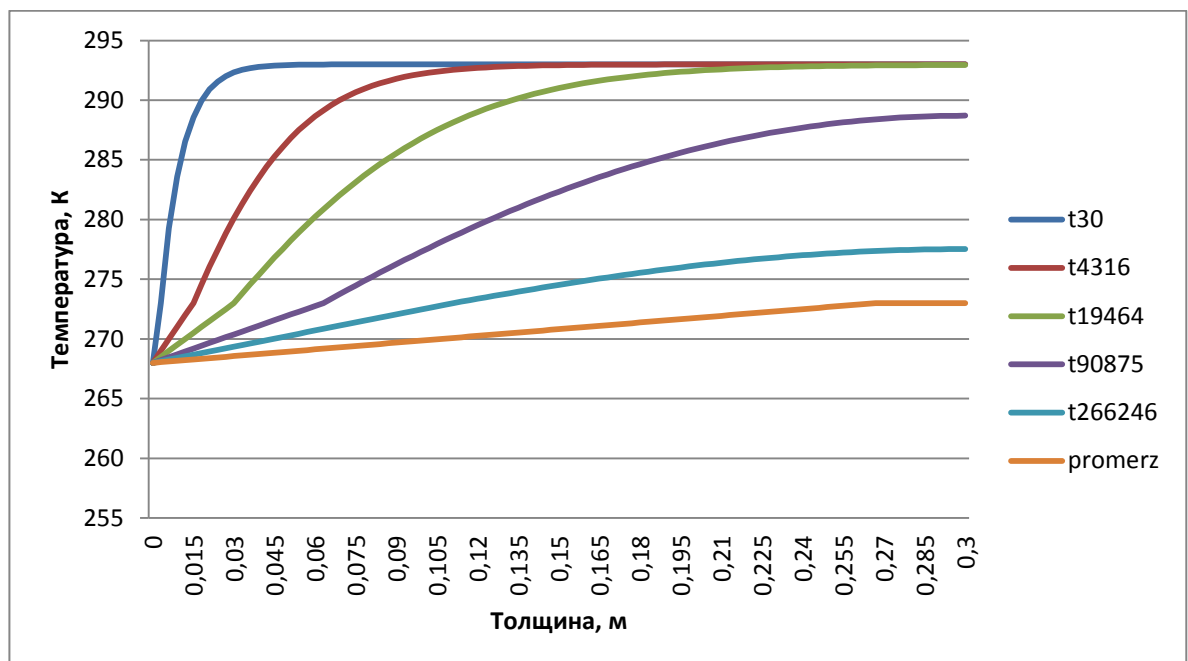


Рисунок 6 – Распределение температуры по толщине пластины в различные моменты времени

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ И ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

#### 3.1 Влияние марки угля на характеристики и условия воспламенения

Теплофизические и термохимические характеристики различных углей в большинстве случаев существенно отличаются. Следовательно, при проектировании топочных устройств водоугольных котельных агрегатов целесообразно учитывать многообразие марок углей.

Экспериментальное определение термохимических и теплофизических характеристик достаточно сложно в связи с наличием большого разнообразия типов и марок угольного топлива. Поэтому, скорее всего, наиболее рациональным является математическое моделирование рассматриваемых процессов.

Физическая и математическая постановка задачи тепломассопереноса при зажигании частиц водоугольных топлив, выполненных из различных марок углей, в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов с ЦКС, представлена в п.2.1 и п.2.2

Задачей численного исследования исследуемого процесса в рамках разработанной модели воспламенения является определения влияния характеристик угольной составляющей ВУТ на характеристики и условия зажигания.

Теплофизические и термохимические характеристики базового материала зависят от марки и места его добычи [65]. В качестве основной составляющей для водоугольного топлива выбраны угли различных марок и месторождений: бурый уголь Ново-Дмитриевского месторождения, марки «Д» Донецкого месторождения, Антрацит Донецкого месторождения и Газовый уголь Кузнецкого бассейна ( ш. Полысаевская).

Используемые при численном моделировании исследуемого процесса теплофизические свойства углей приведены в таблице 1

Таблица 1 – Теплофизические свойства исследуемых углей

Марка угля	Теплофизические свойства		
	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Бурый уголь Ново- Дмитриевского месторождения	1890	1370	0,397
Длиннопламенный уголь Донецкого месторождения	1570	1170	0,207
Антрацит Донецкого месторождения	1420	1643	0,244
Газовый уголь Кузнецкого бассейна ( ш. Полысаевская)	1750	589	0,248

В результате численного моделирования установлены времена задержки зажигания (рисунок 7) частиц ВУТ, выполненных из углей четырех марок при различных температурах внешней газовой среды.

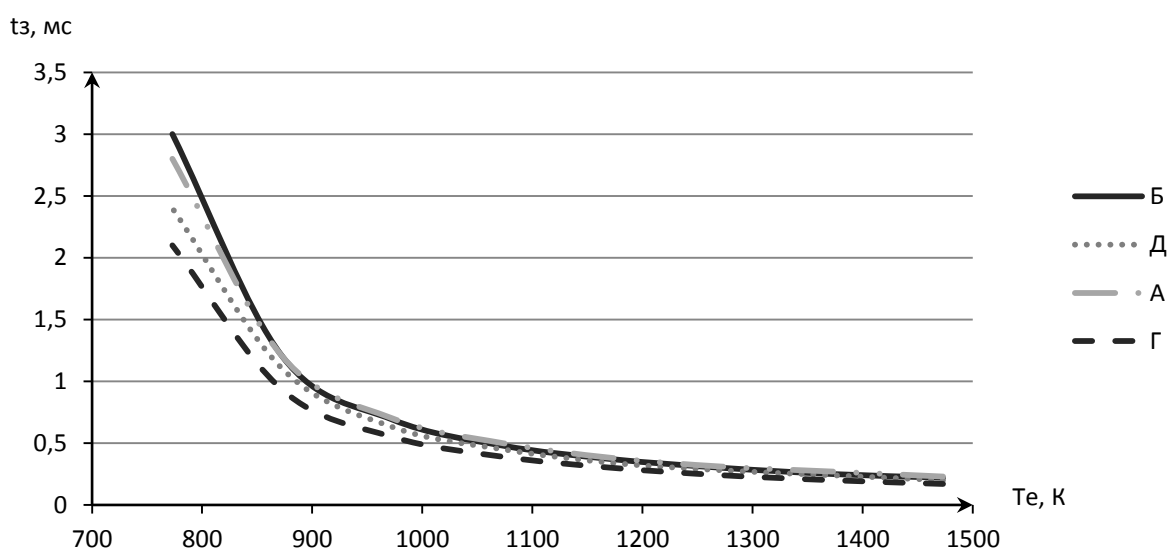


Рисунок 7 – Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешней среды  $T_e$  водоугольных частиц выполненных из углей различных

марок: Б- бурый уголь Ново-Дмитриевского месторождения; Д – уголь марки «Д» Донецкого бассейна; А – антрацит Донецкого месторождения; Г – газовый уголь Кузнецкого бассейна

Установлено, что марка угля оказывает существенное влияние. Так, бурый уголь зажигается медленнее всего. Теплофизические характеристики бурого угля рассматриваемого месторождения приводят к увеличению времени задержки зажигания. Бурый уголь имеет максимальную теплоемкость (из рассматриваемых), соответственно энергии для разогрева водоугольной частицы потребуется больше. Быстрее всего воспламеняются частицы ВУТ, приготовленные из газового угля, что так же обуславливается его теплофизическими свойствами.

Стоит отметить, что влияние марки угля уменьшается с увеличением температуры газовой среды и можно выделить два режима воспламенения: высокотемпературный и низкотемпературный. Так, при температуре  $T_{\text{г}} > 1100\text{K}$  изменение марки угля не оказывает существенного значения. При более низких температурах ( $T_{\text{г}} < 1100\text{K}$ ), где основную роль в зажигании играет доля летучих, влияние марки угля существенно.

### 3.2 Зависимость времени задержки зажигания частиц ВУТ от температуры газовой среды.

Известно, что при зажигании водоугольных частиц в топках с ЦКС температура внутренней среды может варьироваться в достаточном широком диапазоне. Конструктивные характеристики топочного пространства значительно зависят от характеристик процесса зажигания, из чего следует, что изучение процессов воспламенения ВУТ и определение времен задержки зажигания в зависимости от параметров газовой среды внутрикотлового пространства представляет интерес. Физическая и математическая постановка задачи приведены в п. 2.1 и п 2.2.

В результате численных исследований определены значения времен задержки зажигания в зависимости от температуры газовой среды при



различных диаметрах частицы ВУТ (рисунок 8). Видно, что с ростом температуры внутрикотлового пространства время задержки зажигания значительно сокращается. Следует отметить, что температура внешней среды существенно влияет на динамику термической подготовки и воспламенения ВУТ. Уменьшение температуры на 700 К (от 1473 К до 773 К) приводит к замедления зажигания более чем в 10 раз.

Характерный размер частицы также оказывает значительно влияние на характеристики процесса воспламенения. Так при помещении частицы в ВУТ в высокотемпературную среду (1373 К) изменение диаметра частицы в 3 раза (с 0,002 м до 0,006 м) ускоряет процесс зажигания в 5 раз.

Необходимо также отметить, что характер кривых имеет экспоненциальный характер. Установленные зависимости времен задержки зажигания от температуры внешней газовой среды и характерного размера частицы ВУТ отражают целесообразность учета комплекса совместно протекающих процессов термической подготовки.

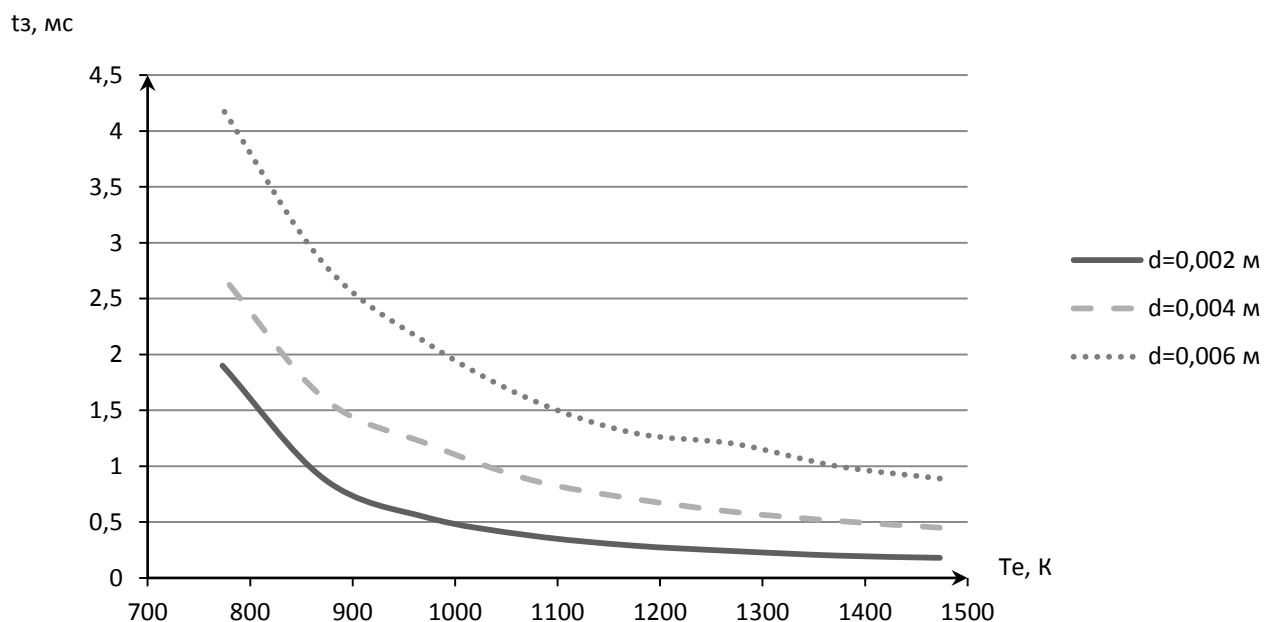


Рисунок 8 – Зависимости характерных времен задержки зажигания частиц ВУТ от температуры внешней среды при различных диаметрах

### 3.3 Влияния температуры инертного материала на характеристики и условия зажигания

Характерной чертой процессов сжигания топлив в кипящем слое является наличие значительного количества инертного материала. В топках котельных агрегатов с циркулирующим кипящим слоем подготовка инертного материала может осуществляться дополнительно и иметь температуру отличную от температуры газовой среды.

Задача теоретического исследования состояла в определении влияния температуры инертного материала на характеристики и условия воспламенения. В результате моделирования установлены времена задержки зажигания в зависимости от температуры инертного материала при различных температурах внешней среды.

Полученные зависимости (рисунок 9) демонстрируют, что влияние температуры инертного материала существенно. Так, при увеличении температуры песка с 1073 К до 1473 К время задержки зажигания возросло более чем в 2 раза.

Можно выделить два режима воспламенения: высокотемпературный и низкотемпературный. При низких температурах инертного материала (ниже 900К) наблюдается влияние как температуры инертных частиц (в данном исследовании песка), так и внешней газовой среды. Изменение  $T_{п}$  на 100 К (с 773К до 873К) при температуре внешней газовой среды 1473 К приводит к сокращению времени задержки зажигания более чем в 1,6 раза. Такое же изменение температуры песка при  $T_{е}=873К$  сокращает время задержки зажигания в 2 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что чем ниже температура окружающей среды, тем большее влияние оказывает температура песка.

При более высоких температурах (выше 900К) температура инертного материала «передавливает» влияние внутрикотловой температуры и времена задержки зажигания не зависят от  $T_{е}$ .

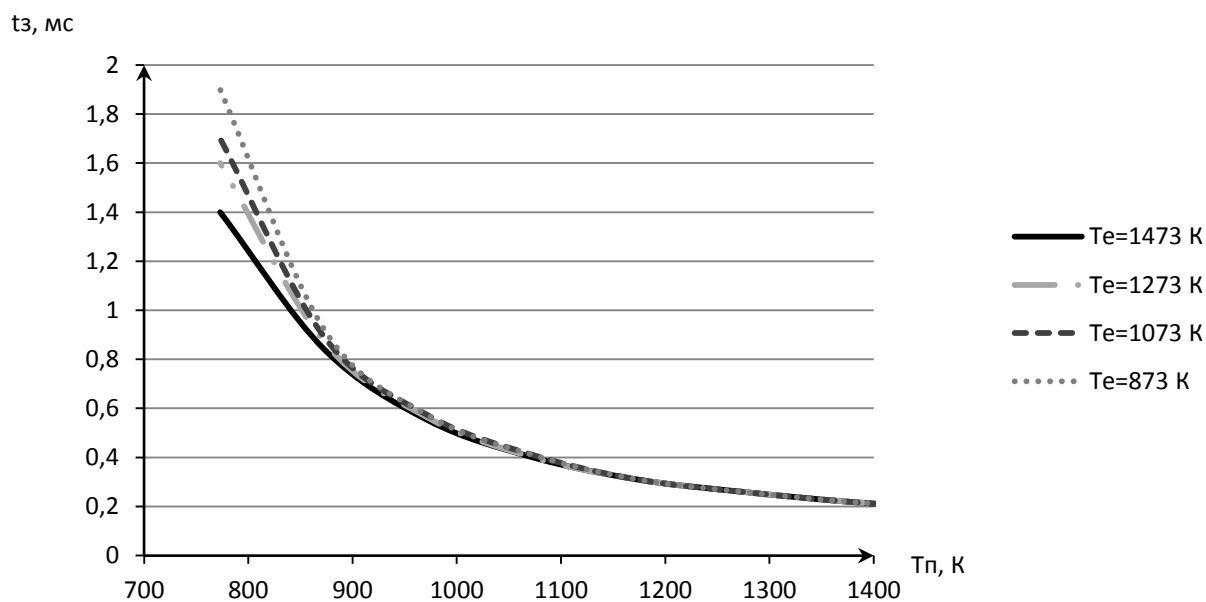


Рисунок 9 – Время задержки зажигания в зависимости от температуры инертного материала при различных температурах внешней газовой среды

### 3.4 Анализ зависимости времени задержки зажигания от природы инертного материала

В топках с циркулирующим кипящим слоем могут быть использованы инертные частицы различной природы. Теплофизические свойства многообразных типов инертного материала существенно отличаются. Следовательно, при проектировании топочных устройств водоугольных котельных агрегатов целесообразно учитывать природу применяемого инертного материала.

Задачи исследования состояли в определении масштабов влияния природы инертного материала на характеристики и условия воспламенения. Физическая и математическая постановка задачи приведена в п 2.1 и п 2.2.

В результате численного моделирования установлены времена задержки зажигания (рисунок 10) для трех типов инертного материала в зависимости от температуры окружающей среды.

В качестве базовых для исследования приняты основные природные инертные материалы (песок, щебень и гравий), теплофизические характеристики которых приведены в [66].

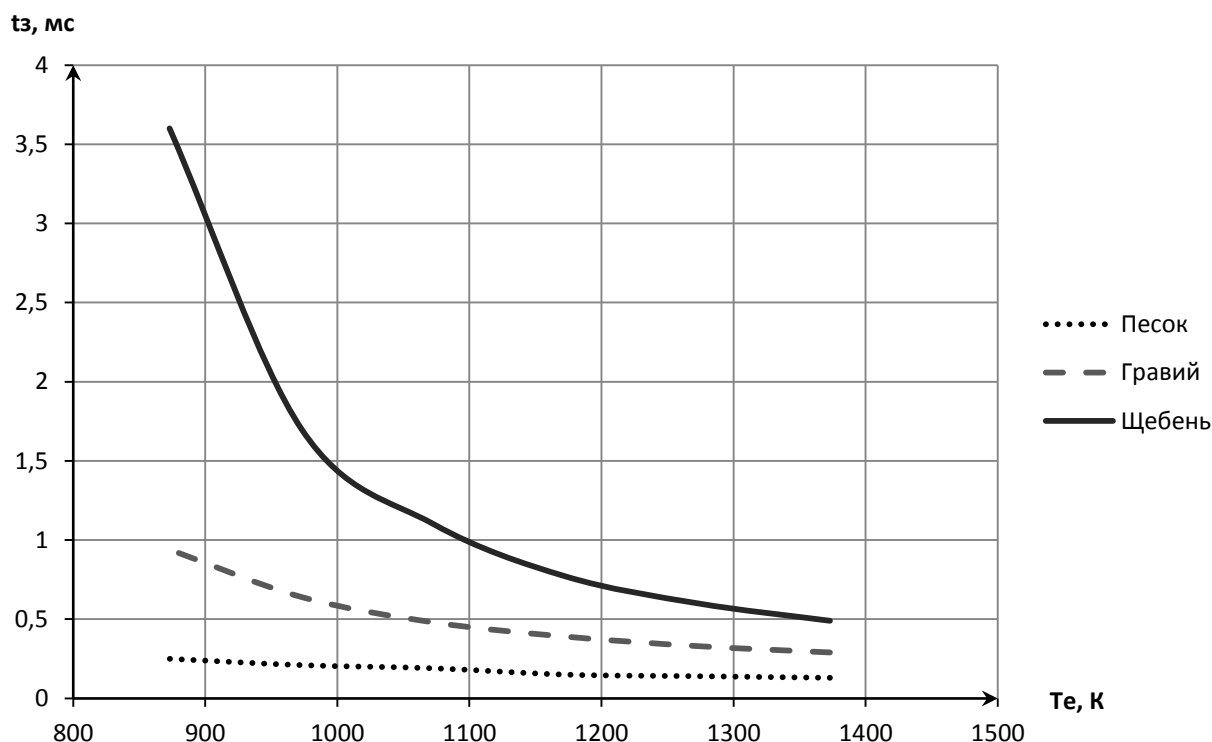


Рисунок 10 – Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешней среды  $T_e$  для различной природы инертного материала

В теоретических исследованиях рассматривались частицы диаметром  $d_ч=0,001$  м, при условии, что инертные частицы подготавливаются в топочном пространстве и имеют температуру внешней среды. Анализ полученных зависимостей показывает, что природа инертного материала оказывает существенное влияние на динамику процесса термической подготовки и воспламенения.

Быстрее всего зажигаются частицы, поверхность которых покрыта песком. Наибольшим временем задержки зажигания обладает водоугольная частица, на поверхность которых «налип» щебень. Это можно объяснить значительным отличием теплофизических свойств инертных частиц.

При прочих равных условиях, времена задержки зажигания при наличии в топочном пространстве частиц песка и щебня отличаются более чем в 10 раз

при низких температурах газовой среды (ниже 1000 К) и примерно в три раза при высоких температурах. Необходимо также отметить, что кривые имеют экспоненциальный характер.

### 3.5 Влияние геометрических размеров частиц ВУТ и инертного материала

Решена задача тепломассопереноса при зажигании частицы водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котла с циркулирующим кипящим слоем, с учетом взаимных размеров водоугольной частицы и частицы инертного материала. Физическая и математическая постановки задач приведены в п.2.1 и п.2.2 соответственно.

Для удобства анализа было введено понятие коэффициента порциальности, равному отношению поверхности, покрытой инертным материалом, к суммарной поверхности частицы ВУТ. Коэффициент порциальности является безразмерной величиной и изменяется в пределах от 0 до 1.

На рисунке 11 приведены результаты решения задачи зажигания в типичном диапазоне диаметров частицы ВУТ. При этом принималось, что инертный материал (песок) дополнительно не подготавливался и имеет температуру внешней среды, равную 1273К.

Анализ полученных на рисунке 10 зависимостей показывает, что коэффициент порциальности оказывает достаточно существенное влияние на характеристики и условия воспламенения на всем исследуемом диапазоне диаметров. Так, изменение коэффициента порциальности с 0,12 до 0,76 в среднем сокращает время задержки зажигания в 1,5 раза.

Чем больше площадь контакта частиц инертного материала с поверхностью частицы ВУТ, тем быстрее происходит зажигание. Это связано с тем, что объем пиролизируемого материала больше. Частицы инертного материала разогреты сильнее, чем капля водоугольной суспензии и при их контакте в области сопряжения происходит интенсивное испарение и почти

моментально начинается процесс пиролиза. При этом происходит интенсивный процесс выхода летучих в газовую область между частицами инертного материала. Соответственно воспламенения продуктов пиролиза происходит быстрее.

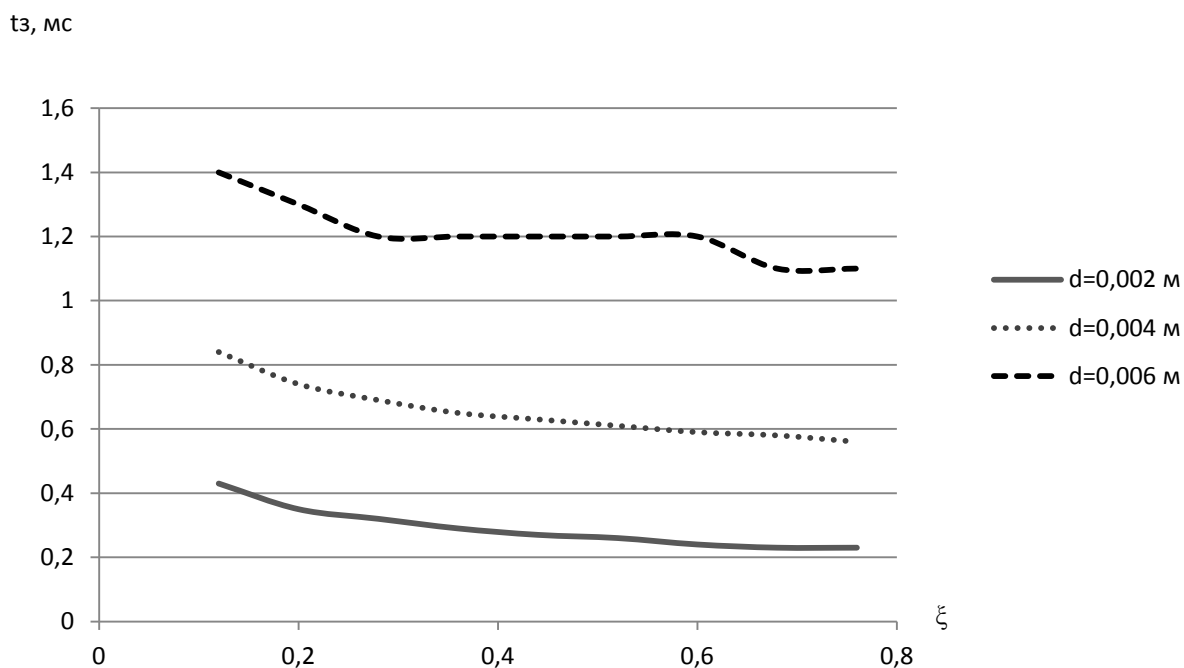


Рисунок 11 – Время задержки зажигания в зависимости от степени порциальности при различных диаметрах частицы ВУТ

Стоит отметить, что при большом диаметре частицы ( $d_q=0,006$  м) в диапазоне коэффициента порциальности от 0,28 до 0,6 время задержки зажигания остается неизменным.

### 3.6 Рекомендации по конструированию топочных устройств водоугольных котельных агрегатов

На основании полученных результатов теоретических исследований условий и характеристик зажигания частиц водоугольного топлива в топочном пространстве котельного агрегата с ЦКС можно составить ряд рекомендаций по практическому применению полученных теоретических данных при разработке технологий сжигания ВУТ в топках данного типа:

1 В связи с тем, что с ростом температуры внешней среды, в которую попадают частицы ВУТ, уменьшается влияние характеристик топлива на время задержки зажигания, при высоких (более 1100K) температурах топочных газов возможно применение упрощенных моделей, которые не учитывают переход котельных агрегатов на другой вид топлива. Но при анализе характеристик зажигания частиц ВУТ, попадающих в низкотемпературную среду (менее 1100K), упрощенные подходы и математические модели не могут быть использованы, так как их применение могут привести к большим погрешностям (до 140%).

Применение водоугольной суспензии в «малой» энергетике является не только перспективным, но и более простым и технологичным, чем в «большой». Поэтому разработанные модели и методы расчета условий и характеристик зажигания ВУТ могут быть эффективно использованы для выбора параметров технологий сжигания таких топлив в условиях котельных агрегатов малой энергетики.

2 Одним из важных выводов, сформулированных по итогам выполненных исследований, является вывод о влиянии температуры инертного материала на времена задержки зажигания. При высоких температурах (выше 900K) температура внешней среды не оказывает влияния на процессы зажигания. В связи с чем, целесообразно дополнительно подогревать инертный материал для котельных агрегатов средней и малой мощности и подавать его с помощью дутьевых вентиляторов параллельно с водоугольной суспензией.

3 Одной из проблем применения технологий сжигания водоугольного топлива в циркулирующем кипящем слое является выбор оптимальных размеров частиц инертного материала. На основании результатов исследования, проведенного в работе, можно рекомендовать использовать более крупные частицы инертного материала таким образом, чтобы он покрывал 80% поверхности частицы ВУТ, так как в этом случае значительно сокращается время задержки зажигания.

4 Выбор оптимального (или хотя бы наиболее предпочтительного) размера одиночных частиц на стадии топливоприготовления также является одной из проблем применения водоугольных топлив в теплоэнергетике. Специфика процесса измельчения углей приводит к существенному увеличению затрат энергии на «помол». С другой стороны наибольшая энергоэффективность достигается при сжигании малых по размерам (десятки микрон) частиц топлива. Кроме того достаточно трудно получить очень «мелкие» частицы водоугольного топлива. При малых размерах последних испарение воды происходит очень быстро и может завершиться до начала стадии зажигания. В этом случае по существу будет протекать процесс горения обычного угольного, мелко размельченного топлива. Соответственно, задача выбора характерных размеров частиц ВУТ является одной из важнейших, но в тоже время и очень сложных, в связи с влиянием большого числа процессов и параметров на условия и характеристики зажигания водоугольных топлив.

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод, что при моделировании процессов зажигания частиц с диаметром меньше 0,005 м могут быть использованы упрощенные модели, не учитывающие индивидуальные свойства угля и размер инертных частиц. Но такой подход не приемлем для «мелких» частиц.



**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Девяшина Елена Вадимовна

Институт	ИШЭ	Отделение/НОЦ	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Теоретическая и промышленная теплотехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Месячный оклад руководителя – 19500 руб.; инженера – 17000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент равен 1,3; накладные расходы принимаются в размере 200 % от заработной платы.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам принимаются равными 30% от ФЗП

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Планирование работ и оценка их выполнения
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Смета затрат на проект
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение практической значимости проекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

--

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Девяшина Елена Вадимовна		

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Темой НИ является термическая подготовка и воспламенение капель водоугольного топлива в условиях интенсивного радиационно-конвективного и кондуктивного нагрева.

Создание математических моделей и анализ основных процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц ВУТ представляют собой актуальные, не решенные до настоящего времени, задачи.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НИ.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

- технико-экономическое обоснование НИ;
- планирование научно-исследовательских работ;
- составление бюджета НИ.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

### 4.1 Планирование работ и оценка времени их выполнения

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят руководитель и инженер. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе был составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, а также проведено распределение исполнителей по видам работ. Сроки исполнения зависят от сложности операций на каждом из этапов.

Все виды выполняемых работ и время их выполнения представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень работ и оценка времени их выполнения

№ п/п	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
1	Выдача и получение задания	Инженер	1
		Руководитель	1
2	Обзор литературы по выбранной теме	Инженер	15
3	Постановка целей и задач исследования (составление плана работы)	Инженер	3
		Руководитель	1
4	Разработка программного продукта	Инженер	48
		Руководитель	3
5	Проведение численных исследований с помощью компьютерных расчетов	Инженер	16
6	Оформление пояснительной записки, составление выводов по проделанной работе	Инженер	22
		Руководитель	2
7	Проверка работы руководителем, выявление ошибок и утверждение ВКР	Руководитель	3
		Инженер	2
Итого		Инженер	107
		Руководитель	10

#### 4.2 Смета затрат на НИР

Бюджет рассчитывается, как затраты на приобретение необходимого оборудования для выполнения НИ и текущие расходы. Затраты на осуществление НИ рассчитываются по следующей формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}}, \text{ руб.},$$

где  $K_{\text{мат}}$  – материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$  – амортизация компьютерной техники;

$K_{\text{з/пл}}$  – затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о}}$  – затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$  – прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$  – накладные расходы.

#### 4.2.1 Материальные затраты

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские товары. Величину этих затрат принимаем 1000 руб:

$$K_{\text{мат}} = 1000 \text{ руб.}$$

#### 4.2.2 Затраты на амортизацию

Амортизация показывает уменьшение стоимости компьютерной техники, на которой выполнялась работа, вследствие ее износа. Амортизация компьютерной техники рассчитывается как:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ руб./год,}$$

где  $T_{\text{исп.кт}}$  – время использования компьютерной техники;

$T_{\text{кал}}$  – календарное время;

$C_{\text{кт}}$  – цена компьютерной техники;

$T_{\text{сл}}$  – срок службы компьютерной техники.

$$K_{\text{ам}} = \frac{109}{365} \cdot 30000 \cdot \frac{1}{5} = 1791,78 \text{ руб./год.}$$

#### 4.2.3 Расходы на оплату труда

Заработная плата – это вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также выплаты компенсационного и стимулирующего характера. Затраты на заработную плату включают в себя выплаты инженеру, разрабатывающему проект, а также научному руководителю и рассчитываются как:

$$K_{\text{з/пл}} = 3П_{\text{инж}}^{\phi} + 3П_{\text{нр}}^{\phi}, \text{ руб.,}$$

где  $3П_{\text{инж}}^{\phi}$  – фактическая заработная плата инженера;

$3П_{\text{нр}}^{\phi}$  – фактическая заработная плата научного руководителя.

Месячная заработная плата инженера и научного руководителя определяется по формуле:

$$ЗП^M = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2, \text{руб.},$$

где  $ЗП_0$  – месячный оклад (инженер 17000 руб., научный руководитель 19500 руб.);

$K_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск, равен 1,1 (10%);

$K_2$  – районный коэффициент равен 1,3 (30%).

$$ЗП_{инж}^M = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.};$$

$$ЗП_{нр}^M = 19500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 27885 \text{ руб.},$$

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_\Phi = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n_\Phi, \text{руб.},$$

где  $ЗП_{мес}$  – месячная заработная плата;

21 – среднее число рабочих дней в месяце;

$n_\Phi$  – фактическое число дней в проекте.

Инженер:

$$ЗП_{инж}^\Phi = \frac{24310}{21} \cdot 109 = 126180,48 \text{ руб.}$$

Научный руководитель:

$$ЗП_{нр}^\Phi = \frac{27885}{21} \cdot 10 = 13278,57 \text{ руб.}$$

$$K_{з/пл} = 126180,48 + 13278,57 = 139458,05 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4 Затраты на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды – обязательные отчисления по нормам, установленным законодательством государственного социального страхования в Фонд социального страхования РФ, Пенсионный фонд РФ, фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг), по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются).

Затраты на социальные нужды принимаются как 30 % от затрат на заработную плату.

$$K_{c.o} = 0,3 \cdot K_{з/пл}, \text{руб.};$$

$$K_{c.o} = 0,3 \cdot 139458,05 = 41837,72 \text{ руб.}$$

#### 4.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются как 10 % от суммы материальных затрат, амортизационных отчислений, затрат на заработную плату и затрат на социальные нужды.

$$K_{пр} = (K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{c.o}) \cdot 0,1, \text{руб.};$$

$$K_{пр} = (1000 + 1791,78 + 139458,05 + 41837,72) \cdot 0,1 = 18408,75 \text{ руб.}$$

#### 4.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы – дополнительные к основным затратам расходы, необходимые для обеспечения процессов производства, связанные с управлением, обслуживанием, содержанием и эксплуатацией оборудования. Накладные расходы принимаются в размере 200 % от затрат на заработную плату.

$$K_{накл} = K_{з/пл} \cdot 2, \text{руб.}$$

$$K_{накл} = 139458,05 \cdot 2 = 278916,1 \text{ руб.}$$

В таблице 4.2 представлена смета затрат на проект.

Таблица 4.2 – Смета затрат НИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИ	1000
2. Затраты на амортизацию	1791,78
3. Расходы на оплату труда	139458,05
4. Затраты на социальные нужды	41837,72
5. Прочие затраты	18408,75
6. Накладные расходы	278916,1
Итого:	481412,4

Вследствие отсутствия как экспериментальных, так и теоретических данных об основных закономерностях процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива сложно проектировать топочные устройства котельных агрегатов ТЭС, работающих на водоугольной суспензии. Разработка математической модели зажигания частицы водоугольного топлива в топках с ЦКС создаст объективные предпосылки для обоснования конструктивных характеристик и компоновок топочных устройств котельных агрегатов ТЭС, схем подготовки топлива с целью повышения эффективности его сжигания.

В данном НИ сформулирована и решена задача тепломассопереноса при зажигании частицы ВУТ в рамках математической модели, которая впервые учитывает сопряженность основных процессов «термической подготовки: инертный прогрев, испарение влаги, термическое разложение органической компоненты топлива, фильтрационный тепломассоперенос, выход летучих горючих компонентов их воспламенение и горение.

Применение ВУТ позволит уменьшить стоимость топливной составляющей 1 Гкал по сравнению с традиционными видами топлива за счет следующих экономических преимуществ:

- снижение затрат на доставку топлива за счёт возможности применения ВУТ как основного в негазифицированных районах, т.к. для его изготовления можно использовать большинство местных углей;
- в качестве сырья возможно использование угольных отсеков с фракциями до 1 – 6 мм, обычно утилизируемых как отход;
- достигается более полное (не менее 98%) сжигание угля в форме ВУТ по сравнению со слоевым сжиганием, что ведёт к отсутствию затрат на утилизацию несгоревшего угля.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Девяшина Елена Вадимовна

Институт	ИШЭ	Кафедра	ТПТ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования	Исследование влияния вредных воздействий рабочей зоны на разработчика и экологической целесообразности применения водоугольного топлива
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ вредных и опасных факторов</li> <li>– общая характеристика помещения</li> <li>– производственный шум.</li> <li>– электромагнитные и электростатические поля</li> <li>– ионизирующее излучение</li> </ul>
<b>2. Охрана окружающей среды</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ влияния объекта исследования на окружающую среду;</li> <li>– анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.</li> </ul>
<b>3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>
<b>4. Пожарная безопасность.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований;</li> <li>– анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований;</li> <li>– мероприятия по предотвращению ЧС.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Василевский Михаил Викторович	к.т.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Девяшина Елена Вадимовна		



## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### Введение

Социальная ответственность – это сознательное отношение какого-либо субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, социальных ценностей, норм, задач и правил, а также гражданского долга, понимание субъектом последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

Социальная ответственность подразделяется на корпоративную и индивидуальную. Корпоративная социальная ответственность – это идея в рамках которой организации учитывают интересы общества и возлагают на себя ответственность за влияние их деятельности на фирмы и прочие заинтересованные стороны современного общества. Согласно данной концепции организации добровольно принимают дополнительные меры для повышения качества жизни работников, их семей, а также местного сообщества и общества в целом. При этом корпорации получают многочисленные преимущества от того, что работают на более широкую и продолжительную перспективу, чем собственная краткосрочная прибыль. Среди социальных вопросов на производстве особое место занимают работа по охране труда, окружающей среды и в чрезвычайных ситуациях.

Широкое внедрение ВУТ может служить основой эффективной замены дорогостоящих дефицитных экологически чистых природных энергоносителей (природного газа и нефти) на многих ТЭЦ и ГРЭС с минимальными капитальными затратами и с сохранением на требуемом уровне вредных выбросов в атмосферу.

Водоугольное топливо является экологически безопасным на всех стадиях производства и использования и при случайных разливах не наносит ущерб окружающей среде. При сжигании ВУТ происходит газификация содержащегося в нем угля с образованием синтез-газа, который вступает в

реакцию с продуктами разложения воды (водород и кислород) при температурах свыше 900 градусов. Благодаря этому достигается почти полное сгорание топлива (до 98%).

### 5.1 Производственная безопасность

Целью данного раздела является выявление и анализ вредных и опасных факторов труда, определение необходимых мер защиты от них работающего персонала, оценка условий труда, микроклимата среды и предоставление рекомендаций по созданию оптимальных условий труда. Рассматриваются вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды.

Основные работы выполнены в 4-ом корпусе Томского Политехнического Университета (аудитория №48).

### 5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Поскольку работа за ЭВМ – это интеллектуальный труд, в рабочее время основная нагрузка у пользователя ЭВМ падает на центральную нервную систему. В связи с этим условия, в которых протекает работа, оказывают влияние на деятельность мозга. Длительная и интенсивная работа на компьютере может стать источником тяжелых профессиональных заболеваний.

Работа инженера тесно связана с компьютерной техникой, поэтому возникает дополнительное воздействие целой группы факторов, которые существенно снижают производительность труда. К таким факторам можно отнести: воздействие вредных излучений от монитора и компьютера, воздействие электромагнитных излучений, неправильная освещенность, ненормированный уровень шума, некомфортные метеорологические условия, высокое напряжение и другие.

#### 5.2.1 Общая характеристика помещения

Площадь рабочего помещения, где находится рабочее место разработчика, составляет 31,7 м<sup>2</sup>. При высоте помещения 3 м объем,

соответственно равен  $95,1 \text{ м}^3$ . В данном помещении предусмотрено 8 рабочих мест. С учетом того, что максимальное число работающих в смену равно 3, на одного человека приходится около  $31,7 \text{ м}^3$  объема помещения и  $10,6 \text{ м}^2$  площади, что в результате удовлетворяет требованиям санитарных норм СанПиН 2.2.2.542-96, согласно которым для одного работника-оператора должны быть предусмотрены площадь величиной не менее  $6 \text{ м}^2$  и объем не менее  $24 \text{ м}^3$ , с учетом максимального числа одновременно работающих в смену.

В рабочем помещении отсутствует принудительная вытяжная вентиляция. Имеется лишь естественная вентиляция. При естественной вентиляции на одного работающего человека необходим объем  $40 \text{ м}^3$  (согласно СНиП 2.04.05-91). Таким образом, можно сделать вывод, что в данном помещении естественной вентиляции достаточно. В итоге можно сказать, что санитарные нормы соблюдены.

#### 5.2.2 Производственный шум

К числу неблагоприятных факторов при выполнении работы инженером относится шум. При длительном воздействии на организм человека шум вызывает снижение остроты зрения, слуха, повышение кровяного давления, снижение внимания и т.д. Основным источником производственного шума в аудитории является шум работающих ЭВМ, питающих устройств и других технических элементов. В соответствии с ГОСТ 12.1.003–83, в помещениях конструкторских бюро, расчетчиков, программистов установлен допустимый уровень звука, равный 50 дБА. Шумящее оборудование, уровни шума которого превышают нормированные, должно находиться вне помещения с ЭВМ. Реально существующий уровень шума в рассматриваемом помещении не превышает допустимый уровень и составляет 35 дБА.

#### 5.2.3 Электромагнитные и электростатические поля

При работе с персональными компьютерами возникают электромагнитные поля (ЭМП). Источниками ЭМП являются видеотерминалы (ВДТ) на электронно-лучевых трубках.

Электромагнитное поле обладает способностью биологического, специфического теплового воздействия на организм человека. Последствия длительного воздействия электромагнитного поля могут быть следующие: повышенная утомляемость, головная боль, сонливость, боль в области сердца, гипертония, нарушение условно-рефлекторной деятельности, изменения межнейронных связей. Указанные явления могут быть слабо, умеренно или явно выражены.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, напряженность ЭМП на расстоянии 50 см. вокруг ВДТ по электрической составляющей, должна быть не более:

- 5 Гц – 2 кГц в диапазоне низких частот (25 В/м);
- 2 – 400 кГц в диапазоне высоких частот (2,5 В/м).

Все компьютеры, находящиеся в аудитории, поддерживают международный стандарт безопасности ТСО 95. Величина излучения от монитора, соответствующего этому стандарту составляет не более:

- 5 Гц – 2 кГц в диапазоне низких частот (10 В/м);
- 2 – 400 кГц в диапазоне высоких частот (1 В/м),

т.е. уровень напряженности не превышает установленных норм.

Электростатическое поле возникает в результате облучения экрана потоком заряженных частиц. Неприятности, вызванные им, связаны с пылью, накапливающейся в электростатически заряженных экранах, которая летит на оператора во время его работы за монитором. Это может служить причиной кожных заболеваний, порчи контактных линз. Эксперты полагают, что низковольтный электромагнитный разряд способен изменять и прерывать клеточное развитие.

Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В. Мониторы, удовлетворяющие стандарту ТСО 95, имеют электростатический потенциал, не превышающий 500В, что соответствует требованиям безопасности.

#### 5.2.4 Ионизирующее излучение

К числу вредных факторов для инженеров-программистов относится излучение. Источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить торможение функций кроветворных органов, нарушение нормальной свертываемости крови и увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение сопротивляемости организма инфекционным заболеваниям.

При работе дисплеев возникают побочные эффекты: генерация рентгеновского излучения от экрана и отражение. Для устранения последнего все дисплеи размещены вдоль стен. Прямое рентгеновское излучение уменьшается за счет специального внутреннего покрытия экрана монитора и установки дополнительного защитного фильтра.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, доза рентгеновского излучения на расстоянии 0,05 м от экрана ПЭВМ не должна превышать 0,1 мбэр/час. Анализ радиационно-гигиенических характеристик отечественных телевизоров показывает, что мощность дозы уже на расстоянии 10 см от экрана не превышает предельных значений. Учитывая, что уровень излучения от экрана монитора имеет такое же, а в некоторых случаях меньшее, значение можно сделать вывод, что уровень излучения находится в пределах допустимого.

### 5.3 Охрана окружающей среды

Сегодня состояние окружающей среды требует от создателей новых технологий и машин пристального внимания к вопросам экологии. Любое техническое решение должно приниматься с учетом не только технологических и экономических требований, но и экологических аспектов.

Для широкого использования угля на электрических станциях следует решить экологические проблемы, связанные с выбросами в атмосферу оксидов азота, серы и также образованием шлака в процессе сжигания. Слабая проработанность таких научно-технических проблем стимулирует развитие новых «чистых» угольных технологий (энерго- и экологоэффективных). Одним

из наиболее перспективных технологических решений по оптимизации процессов топливосжигания на ТЭС является водоугольное топливо (ВУТ).

Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является безотходная технология. Под понятием «безотходная технология» следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах, от обработки сырья до использования готовой продукции. В результате чего сокращается до минимума количество вредных выбросов и уменьшается воздействие отходов на окружающую среду до приемлемого уровня. В этот комплекс мероприятий входят:

1. создание и внедрение новых процессов получения продукции с образованием наименьшего количества отходов;
2. разработка различных типов бессточных технологических систем и водооборотных циклов на базе способов очистки сточных вод;
3. разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы;
4. создание территориально-промышленных комплексов, имеющих замкнутую структуру материальных потоков сырья и отходов внутри комплекса.

В области создания и внедрения безотходной технологии успехи достигнуты в ряде отраслей промышленности, однако полный перевод ведущих отраслей промышленности на безотходную технологию потребует решения большого комплекса весьма сложных технологических, конструкторских и организационных задач. Поэтому до всестороннего внедрения безотходной технологии важными направлениями экологизации промышленного производства считаются:

5. совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов примесей и отходов в окружающую среду;
6. замена токсичных отходов на нетоксичные;
7. замена не утилизируемых отходов на утилизируемые;

8. применение пассивных методов защиты окружающей среды.

Пассивные методы защиты окружающей среды включают комплекс мероприятий по ограничению выбросов промышленного производства с последующей утилизацией или захоронением отходов. К их числу относятся:

9. очистка сточных вод от примесей;
10. очистка газовых выбросов от вредных примесей;
11. рассеивание вредных выбросов в атмосфере;
12. глушение шума на путях его распространения;
13. мероприятия по снижению уровней инфразвука, ультразвука и вибраций на пути их распространения;
14. экранирование источников энергетического загрязнения окружающей среды;
15. захоронение токсичных и радиоактивных веществ.

Следует отметить, что проблема защиты окружающей среды требует усилий специалистов разного профиля. Особое значение имеет количественная оценка последствий загрязнения окружающей среды и оценка ущерба, нанесенного населению. Так, в качестве сырья для ВУТ можно использовать канализационные стоки и отходы с содержанием органики, а также возможна утилизация автомобильных покрышек путём получения из них пирокарбона, служащего сырьем для ВУТ.

Помимо перечисленного, ВУТ имеет следующий ряд экологических преимуществ:

- зола от сжигания такого топлива содержит не более 3% несожжённого углерода, поэтому не требует утилизации и может применяться как наполнитель для бетонов;
- отсутствуют выбросы шлака в атмосферу, т.к. механический недожог угля в составе ВУТ составляет не более 1%;
- достигается значительное уменьшение выбросов оксидов азота, оксидов углерода и оксидов серы по сравнению со слоевым сжиганием угля.

## 5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В аудитории используются средства вычислительной техники, поэтому необходимо проведение организационных и технических мероприятий, призванных обеспечить защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги и статического электричества. Разработка мероприятий и требований, направленных на устранение этих причин позволяет создать безопасные и благоприятные условия для труда человека.

Поражение человека электрическим током или электрической дугой может произойти в следующих случаях:

1. при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
2. при однофазном (однополюсном) прикосновении незаземленного от земли человека к незаземленным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;
3. при прикосновении к нетоковедущим частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции;
4. при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением;
5. при возможном коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания, блоке развертки монитора.

Кроме того, не следует работать в условиях повышенной влажности (более 75%), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли или токопроводящих полов. Рабочее помещение по опасности электропоражения относится к помещениям без повышенной опасности, так как является сухим помещением с нормальной температурой воздуха, отсутствием пыли, изолирующими полами из ПВХ.

Во время работы с ПК для предупреждения электротравматизма очень важно проводить соответствующие организационные и технические мероприятия. К организационным мероприятиям относятся: доступ к работе,



надзор во время работы, оформление перерыва в работе, переводов на другое рабочее место, окончания работы, вводный инструктаж на рабочем месте. Основными техническими мероприятиями являются: отключение оборудования на участке, выделенном для производства работ, и принятие мер против ошибочного или самопроизвольного включения; ограждение при необходимости рабочих мест и оставшихся под напряжением токоведущих частей; вывешивание предупредительных плакатов и знаков безопасности; проверка отсутствия напряжения; наложение заземления.

Особое внимание в данных мероприятиях уделяется защите от статического электричества. Наибольшие разрядные токи статического электричества возникают при прикосновении персонала к элементам ЭВМ. Такие разряды непосредственной опасности для человека не представляют, однако приводят к неприятным ощущениям в виде укола или толчка. Кроме того, разрядные токи статического электричества могут привести к выходу из строя ЭВМ.

Требования, предъявляемые к обеспечению электробезопасности пользователей, работающих на ПК, могут быть следующие:

1. все узлы одного ПК и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;
2. корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;
3. для отключения ПК должен использоваться отдельный щит с автоматами защиты и общим рубильником;

все соединения ЭВМ и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

## 5.5 Пожарная безопасность

Пожар в помещении наносит материальный ущерб, а также несет угрозу жизни и здоровья людей, находящихся в этом помещении.

Согласно общероссийским нормам технологического проектирования ОНТП 26-84, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. В рабочем помещении имеется электропроводка напряжением 220 вольт, предназначенная для питания вычислительной техники и освещения. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования. Известно, что для отвода избыточной теплоты от ЭВМ служат системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако системы вентиляции и кондиционирования могут стать дополнительными источниками распространения возгорания. Данное помещение относится к категории В.

Необходимо в аудитории проводить следующие мероприятия:

1. пожарно-профилактические: организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта; эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования; технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов;
2. организационные мероприятия: противопожарный инструктаж обслуживающего персонала; обучение персонала правилам техники безопасности; издание инструкций, плакатов, планов эвакуации;
3. эксплуатационные мероприятия: соблюдение эксплуатационных норм оборудования; обеспечение свободного подхода к оборудованию.

Из вышесказанного следует, что дополнительных мер защиты не требуется.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В рабочем помещении имеется 1 огнетушитель и общий обесточивающий рубильник, в случае возникновения пожароопасной

ситуации необходимо обесточить помещение, используя огнетушитель ликвидировать очаг возгорания и эвакуироваться из помещения (рис. 5.1).

Наиболее дешевым и простым средством пожаротушения является вода, поступающая из обычного водопровода. Для осуществления эффективного тушения огня используют пожарные рукава и стволы, находящиеся в специальных шкафах. В пунктах первичных средств огнетушения должны располагаться ящик с песком, пожарные ведра и топор.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно своевременно организовать эвакуацию людей.

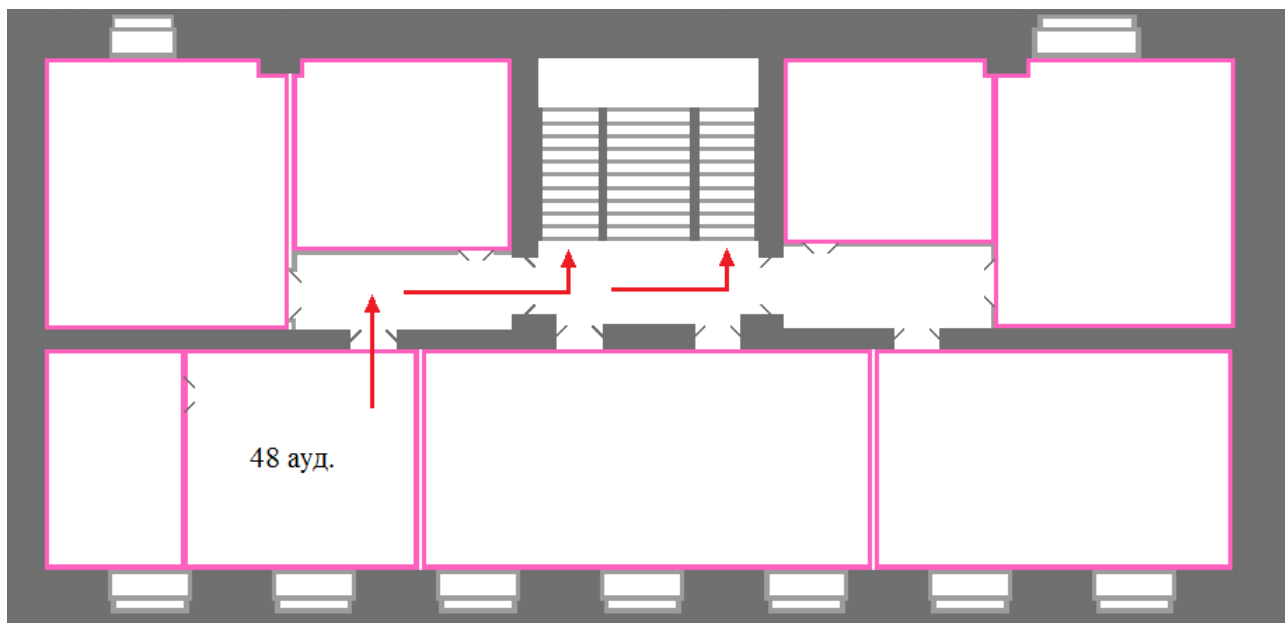


Рисунок 5.1 – План эвакуации

#### 5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»

Разработка математической модели зажигания частицы водоугольного топлива в топках с ЦКС создаст объективные предпосылки для обоснования конструктивных характеристик и компоновок топочных устройств котельных агрегатов ТЭС, схем подготовки топлива с целью повышения эффективности его сжигания.

В связи с тем, что водоугольное топливо является стабильным, экологически безопасным на всех стадиях производства и использования,, а также пожаро- и взрывобезопасным топливом, разработка данной модели является экологически целесообразной.

В разделе проанализированы вредные и опасные факторы труда, разработаны меры защиты от них, оценены условия труда и микроклимата рабочей среды. Рассмотрены вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даны рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выпускной квалификационной работы заключаются в следующем:

1 Сформулирована математическая модель процесса зажигания частицы водоугольного топлива в топочном пространстве котельного агрегата с ЦКС, учитывающая совместное протекание основных процессов термической подготовки: теплопроводность, влагоудаление, термическое разложение органической части топлива с выходом летучих, экзотермическое взаимодействие продуктов термического разложения с окислителем на поверхности частицы. Верификация полученной модели позволяет судить о корректности численной модели и возможности применения полученных в результате теоретических исследований данных для формирования методик проектирования рассматриваемых топочных устройств.

2 Проведены численные исследования основных закономерностей процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива различного диаметра. Проведен анализ влияния на условия и характеристики зажигания:

- температуры внешней среды;
- размеров частиц инертного материала;
- размеров частиц ВУТ;
- температуры инертного материала;
- марки угля;
- природы инертного материала.

3 Исходя из полученных времен задержки зажигания видно, что частица ВУТ, попадающая в топочное пространство с циркулирующим кипящим слоем, зажигается почти моментально (в диапазоне температур от 773К до 1473К). При этом выделены два возможных режима воспламенения: высокотемпературный, при котором влияние марки угля (его теплофизических характеристик) и температуры внешней газовой среды, по сравнению с

температурой инертного материала не оказывают существенного влияния, и высокотемпературный, при котором такое влияние несущественно.

4 Проведено численное исследование процесса зажигания частиц ВУТ различных диаметров. Размер частицы оказывает существенное влияние на времена задержки зажигания. Так частица диаметром  $d_{\text{ч}}=0,002$  м зажигается до 5 раз быстрее, чем частица диаметром 0,006 м при прочих равных условиях.

5 Установлено влияние характерных размеров частиц инертного материала на условия и характеристики воспламенения. Проведенные теоретические исследования показали, что увеличение размеров частиц инертного материала в два раза снижают время задержки зажигания на 35%. При этом при диаметре частицы ВУТ 0,002 м оптимальным является инертный материал с характерным размером 1,5 мм.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Экономика России, цифры и факты. Часть 7 Энергетика. Структура энергетического комплекса РФ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://utmagazine.ru/>

2 Энергетическая стратегия России на период до 2030 года// распоряжение Правительства Российской Федерации №1715-р от 13.11.2009г.

3 Рогалев Н.Д., Прохоров В.Б., Курдюкова Г.Н., Хатунцева Н.В. Исследования загрязнения воздушного бассейна Москвы выбросами предприятий теплоэнергетики и автотранспорта.//Московский энергетический институт. 2003. – №12. С.2–7.

4 Делягин Г.Н., Исаев В.В. Теоретический анализ процесса горения водоугольной суспензии при внешней тепловой стабилизации факела // Горение твердого топлива: матер. 4 Всесоюз. конф., Новосибирск, 19-21 марта 1974 г. В 3 ч. Ч.1. - Новосибирск: Наука, 1974. - С.53-58.

5 Kijo-Kleczkowska A. 2011. Combustion of coal–water suspensions. Fuel, 90, с. 865–877.

6 Ходаков Г.С. Водоугольная суспензия в.//Теплоэнергетика. 2007. №1. С.35–45.

7 Саломатов В.В., Дорохова У.В., Сыродой С.В. Перевод котлов малой мощности на водоугольное топливо.//Ползуновский. - 2013. - № 4-3. - С.38-46.

8 Оценка эффективности применения водоугольного топлива в качестве альтернативы каменному углю [Электронный ресурс]/ Технические науки, №47-4, 2016 г. Режим доступа: novainfo.ru.

9 Костовецкий С.П., Мурко В.И., Олофинский Е.П. Некоторые результаты исследований процессов приготовления, транспортирования и прямого сжигания водоугольной суспензии // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем.

10 Старченко А.В., Саломатов В.В., Гиль А.В., Сеницын В.А., Мальцев Л.И., Сыродой С.В. Математическое моделирование сжигания водоугольного

топлива в вихревом топочном устройстве// Горение и Плазмохимия, т10, №2, □ 2012. С95-105.

11 Берг Б.В., Богатова Т.Ф. Тепло- и массоперенос в топках с кипящим слоем при сжигании водоугольной смеси // Инж.-физ. журн. - 1996. - Т.69, № 6. - С.993-999. - Библиогр.: 7 назв.

12 Богатова Т.Ф. Сжигание обводненных отходов мокрого углеобогащения в низкотемпературном кипящем слое: автореф. дис. ... канд. техн. наук / УПИ. - Свердловск, 1991. - 24 с.

13 Вессельман С.Г., Лугинин Н.Е., Дробышев Л.В. Циклонная топка для исследования процесса сжигания обводненной каменноугольной мелочи // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. - М.: Наука, 1967. - С.184-186.

14 Вихревая технология сжигания суспензионного водоугольного топлива. Экологические аспекты / Журавлева Н.В., Мурко В.И., Федяев В.И. и др. // Экология и пром-сть России. - 2009. - Янв. - С.6-9

15 Воскобойников П.С., Яковенко А.В. Сравнительный анализ факельного сжигания топлива в виде ВУТ с традиционным слоевым сжиганием // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: 2 междунар. науч.-практ. конф., Междуреченск, 3-5 апр. 2013. - Междуреченск: фил. КузГТУ, 2013. - С.73-76.

16 Рябов Георгий Александрович. Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое: диссертация доктора Технические наук: 05.14.14 / Рябов Георгий Александрович, 2016.- 291 с.

17 Сыродой С. В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.14.14 : спец. 01.04.14 / С. В. Сыродой ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИН), Кафедра теоретической и промышленной



теплотехники (ТПТ) ; науч. рук. Г. В. Кузнецов ; В. В. Саломатов. — Томск, 2014. — 18 с. : ил.

18 Okasha F, Miccio M. Modeling of wet jet in fluidized bed. Chem Eng Sci, 2006;61:3079–90.

19 Son SY, Kihm KD. Effect of coal particle size on coal–water slurry (CWS) atomization. Atom Sprays 1998;8:503–19.

20 Делягин, Т.Н. Угольные суспензии - новое экологически чистое топливо и технологическое сырье. Обзорная информация / Т.Н. Делягин, Е.А. Ельчанинов, В.М. Еремеев и др. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. -1991. — №9.-105с.

21 Делягин, Т.Н. Жидкое топливо на основе угольных суспензий: возможности и перспективы использования / Т.Н. Делягин, Я.М. Каган, А.С. Кондратьев // Российский химический журнал. - 1994. - №3. - С. 2227.

22 Олофинский, Е.П. Вопросы использования водоугольного топлива на тепловых электростанциях / Е.П. Олофинский // Теплоэнергетика. - 1989. - №12.- с. 64-66.

23 Делягин, Г.Н. Водные дисперсные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо / Г.Н. Делягин, А.П. Петраков, Г.С. Головин, Е.Г. Горлов // Российский химический журнал. - 1997. — №6.-с. 72-77.

24 Втюрин, Ю.Н. Техничко-экономические проблемы использования углей Канско-Ачинского бассейна на ТЭС в европейской части России / Ю.Н. Втюрин, П.Я. Кузнецов // Теплоэнергетика. - 1997. - №2. - с. 23-28.

25 Делягин, Г.Н. "ЭКОВУТ" - новое экологически чистое топливо XXI века / Г.Н. Делягин, С.Ф. Ерохин, А.П. Петраков // Сб. тр. межд. научн. конф. и школы семинара ЮНЕСКО "Химия на рубеже тысячелетий", Клязьма, 2000.- М.: Изд-во МГУ. - 2000.- ч.1.~ с. 101-105.

26 Делягин, Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха// Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. - М.: «Наука». - 1967. - С.45-55.

27 Делягин, Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий на опытно-промышленной установке / Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович, В.И. Караченцев и др. // Уголь. - 1964. - № 9. - С. 86-87.

28 Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива// Издательство СССР. 1958 □ 601с.

29 Давыдова, И.В. Экспериментальное исследование процесса горения водоугольной суспензии / И.В. Давыдова, Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович и др. // Тепло- и массоперенос. - «Наука и техника». - Т. 4. - Минск. - 1966.

30 Давыдова, И.В. Реологические свойства высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий / И.В. Давыдова, В.А. Кликун, И.А. Коц. — «Наука». - 1967. - С. 78-83.

31 Онищенко, А.Г. Промышленное сжигание водоугольных суспензий / А.Г. Онищенко, Г.Н. Делягин // Обогащение и брикетирование углей. — М. - 1968.- №2.

32 Онищенко, А.Г. Исследование горения и теплообмена при сжигании водоугольных суспензий в топке парового котла для промэнергетики // автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. - М. - 1969. - С. 25.

33 Исаев, В.В. Влияние зольности на основные теплотехнические характеристики при сжигании отходов углеобогащения в виде водоугольной суспензии / В.В. Исаев // Горение дисперсных топливных систем. - М.: Наука. - 1969.

34 Исаев, В.В. Энергетическое использование отходов углеобогащения путем их сжигания в виде водоугольных суспензий на углеобогатительных фабриках / В.В. Исаев, Г.Н. Делягин, В.М. Иванов // Вопросы гидравлической добычи угля: тр. ВНИИгидроугля. - Новокузнецк. -№XIII. - 1968. - С. 148-156.

35 Исаев, В.В. Исследование процесса сжигания отходов углеобогащения в виде водоугольных суспензий над слоем топлива / В.В. Исаев // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. - М.: «Наука». — 1969.-С.93.

36 Исаев, В.В. Разработка и исследование процесса термической переработки обводненных отходов обогащения: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / В.В. Исаев. - М.: 1996. - С. 32.

37 Бутылькова, Т.И. Сжигание обводненных каменных углей с малым содержанием летучих в виде водоугольных суспензий и опытной топке парового котла / Т.И. Бутылькова, Е.И. Вулканов, Г.Н. Делягин и др. // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. -М.: «Наука». - 1967.- С.135-145.

38 Бутылькова, Т.Н. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий и характеристика отложений на поверхностях нагрева / Т.Н. Бутылькова, Г.Н. Делягин // Химия. - №15. - 1986.

39 Шварц, О. Непосредственное сжигание водоугольных суспензий на электростанциях / О. Шварц, Г. Мертен // Глюкауф. — №5. - 1967. - С. 27

40 Тайдзо, И., Сжигание угольной пульпы в циклонной топке / И. Тайдзо, С. Сутиэро. - СЭНТАН: Коал Препарат. - 1965. - №3. - С. 15-21.

41 Сенчурова Ю.А. Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках. Кандидатская диссертация. – ФАО ГОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет». – 2008.

42 Мурко В.И., Риестерер А., Цецорина С.А., Федяева В.И., Карпенюк В.И. Результаты численного моделирования процесса сжигания водоугольного топлива.// Ползуновский вестник. – 2011., № 2. – С. 230-234.

43 Голубев В. А. , Афанасьев К. С. , Гиль А. В. , Пузырев М. Е. , Мурко В. И. Применение математического моделирования при разработке вихревых топок "Торнадо" и переводе энергетических котлов на совместное сжигание низкосортных топлив // Теплофизика и энергетика: сборник тезисов докладов конференции с международным участием "VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике", Екатеринбург, 12-14 Ноября 2013. - Екатеринбург: УрФУ, 2013 - С. 57

44 Мурко В.И., Сенчурова Ю.А., Федяев В.И., Карпенюк В.И. Исследование технологий сжигания суспензионного угольного топлива в

вихревой камере // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013., № 2. – С. 103-105.

45 Модель сжигания суспензионного угольного топлива / Сенчурова Ю.А., Мурко В.И., Федяев В.И., Дзюба Д.А. // Горение твердого топлива: сб. докл. VII всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 10-13 нояб. 2009. В 3 ч. Ч.2. - Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2009. - С.144-149.

46 Мурко В.И., Федяев В.И., Сенчурова Ю.А. Результаты разработки новой модели сжигания суспензионного угольного топлива // Всерос. семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике, Красноярск, 13-15 мая 2009: тез.докл. - Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2009. - С.77.

47 Цепенюк А.И., Овчинников Ю.В., Луценко С.В., Квирившвили А.Р., Лаврененко А.А., Межов Е.А. Численные исследования сжигания композитного водоугольного топлива в котле типа ДКВР-20-13. "VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива»", Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13-16 Ноября 2012. - Новосибирск, 2012 - С. 102.1-102.9.

48 Овчинников Ю.В., Цепенюк А.И., Шихотинов А.В., Татарникова Е.В./ Исследование воспламеняемости твердых топлив и ИКЖТ//Докл. АН ВШ РФ. - 2011. - № 1(16). - С.117-126.

49 Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое/С. С. Забродский. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.

50 Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем/ С. С. Забродский. – М.: «Энергия», 1971. – 328 с.

51 Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов с стационарным и кипящим слоем/ М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.

52 Основы техники псевдооживления/Н. И. Гальперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.

53 Аппараты с кипящим зернистым слоем/ О. М. Тодес, О. Б. Цитович. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.

54 Процессы тепло– и массопереноса в кипящем слое/Под ред. А. П. Баскакова. – М.: Металлургия, 1978. – 247 с.

55 Ашунков, А.И. Технология и устройства для приготовления трубопроводного транспорта и азрорирования водоугольной суспензии / А.И. Ашунков, В.А. Шалауров // Материалы семинара "Автоматизация технологических процессов на топливно-энергетических и трубопроводно-транспортных предприятиях России". — Конструкторско- технологический институт вычислительной техники СО РАН. — 1998.

56 Хидиятов А.М., Осинцев В.В., Гордеев С.В.// Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии/ Теплоэнергетика. - 1987. - № 1. - С.5-11.

57 Мурко В.И., Дзюба Д.А., Коржов В.М. Результаты эксплуатации опытно-промышленной установки по приготовлению и сжиганию водоугольного топлива из угольных шламов в котельной шахты "Тырганская"// Энергосбережение и энергоэффективность экономики Кузбасса. - 2005. - № 1 / 8. - С.91-94.

58 Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива // Горение и плазмохимия: – ч. 1, 2007, вып. 3, с. 178-188; – ч. II, 2007, вып. 3, с. 187-197; – ч. III, 2008, вып. 1, с. 56-59; – ч.IV, 2008, вып. 4, с. 178-187.

59 Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч.2. Стадия испарения // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т. 5, вып. 3 – С. 189-197.

60 Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч.3. Стадия воспламенения //Горение и плазмохимия. - 2008. - Т.6, № 1. - С.56-59.

61 Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Часть IV. Стадия выгорания // Горение и плазмохимия. - 2008. - Т.6, № 3. - С.171-178.

62 Сыродой С.В., Саломатов В.В. Зажигание водоугольной частицы лучисто-конвективным теплом // Горение и плазмохимия. – 2011. – Т. 9, № 1. – С. 29-34.

63. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. – 616 с.

64 Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975.

65 Агроскин, А.А. Теплофизика твёрдого топлива / А.А. Агроскин, В.Б. Глейбман. – М.: Недра, 1980. – 256 с.

66 Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.